SCIENCES ET AVENIR

© GERGITEK/SHUTTERSTOCK - MIA STENDAHSHUTTERSTOCK

Numéro double

Intelligence artificielle
Physique des particules
Paléoanthropologie
Astronomie
Médicaments
Quantique
Matériaux
Cancers
Microbiote
Climat...

2000 - 2025

Les 25 GRANDES DÉCOUVERTES

...ET LES 25 PROCHAINES

+ Jeux de l'été

SCIENCES ET AVENIR - N° 941/942 - JUILLET - AOÛT 2025 - LES 25 GRANDES DÉCOUVERTES
JUILLET - AOÛT 2025 - N° 941/942 - BEL 6,90€ - LUX 6,90€ - CH 11,70CHF - D 8,60€ - IT 6,90€ - ESP 6,90€ - GR 6,90€ - PORT-CONT 6,90€ - DOM 7,10€ - NCAL 980XPF - MAR 70MAD - TUN 14TND - CAN 10,50$CAD
L 13418 - 941 - F: 6,50 € - RD

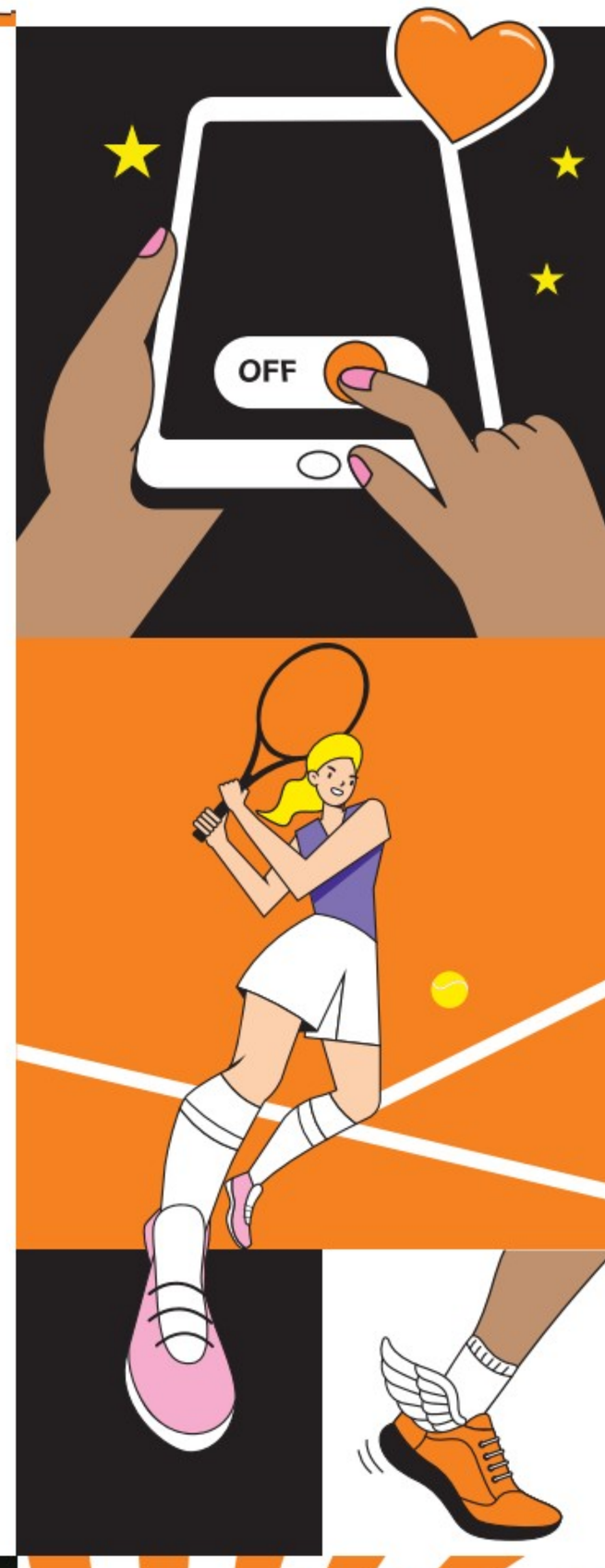
Refusons la haine en ligne

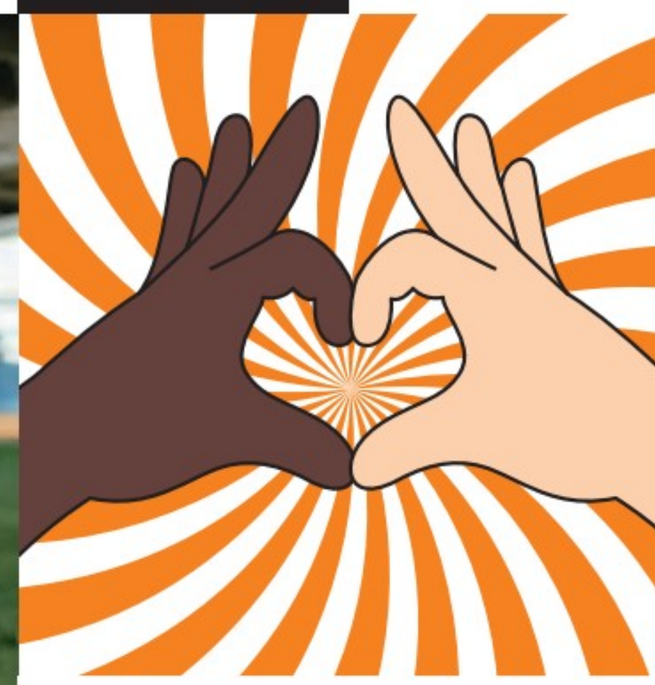
Ensemble, ayons les bons réflexes.
Orange a lancé l'initiative #ForGoodConnections pour encourager un usage responsable du numérique et organise des journées qui allient sports et ateliers pédagogiques dans 25 pays dans le monde.

Depuis 2021, ce sont plus de 600 000 jeunes sensibilisés dont 500 000 en France.

Nos journées ici

For Good Connections





orange™
est là

Orange SA au capital de 10 640 226 396 € - RCS Nanterre 380 129 866
Siège social : 111, quai du Président Roosevelt 92130 Issy-les-Moulineaux

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Marions les cultures !

« Notre avenir dépend-il de la technique ? » « La vérité est-elle toujours convaincante ? » Voici les deux sujets de dissertation du baccalauréat général pour l'épreuve de philosophie proposés aux élèves de terminale le 16 juin dernier. Questions intemporelles mais aux réponses ô combien différentes pour une copie rendue en l'an 2000 ou cette année. Comment traiter le premier sujet sans intégrer l'intelligence artificielle ? Comment aborder le second sans parler de ce concept étrange pour un esprit formé à la méthode scientifique qu'est la « post-vérité » ? Deux nouveaux mots parmi la sélection que nous vous proposons, page 53, dans notre dossier consacré à un premier bilan des découvertes du XXIe siècle. À *Sciences et Avenir*, premier magazine scientifique français sur le plan de la diffusion, nous militons infatigablement pour que la « culture scientifique » ne soit jamais dissociée de la « culture générale ». Il est impossible à un citoyen de participer au débat démocratique sans une solide culture scientifique, littéraire, artistique ou historique. Au moment d'écrire ces lignes, une actualité politique se cristallise autour d'un des bâtiments les plus emblématiques de Paris et qui, justement, incarne la culture : le Grand Palais. Ce chef-d'œuvre architectural a été construit pour l'exposition universelle de 1900 afin de faire rayonner la puissance industrielle, artistique et culturelle de la France. Lieu d'accueil des salons de l'automobile, de l'aviation, des beaux-arts, de la mode… et des œuvres de Claude Monet en 2010, où 900 000 personnes s'étaient déplacées — un record. En son sein, le palais de la Découverte, dont l'existence est aujourd'hui menacée, recevait entre 500 000 et 600 000 visiteurs avant sa fermeture pour travaux en 2020. À l'heure des réseaux sociaux qui enferment les citoyens dans des bulles communautaires, comment imaginer ce lieu sans un espace scientifique ? De même, comment imaginer l'information sans sa dimension scientifique ? La survie des lieux de science, des journaux qui parlent de science, se joue aujourd'hui. ■

Il est impossible de participer au débat démocratique sans culture scientifique, littéraire, artistique ou historique

VOUS ÊTES ÉTUDIANT
ABONNEZ-VOUS DÈS MAINTENANT
profitez d'une remise exceptionnelle
en scannant ce QR code

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro B. BEAUJEU, P. BERLOQUIN, S. BRIET, F. COSTES, O. DAILLET, E. DAUTRY, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, M. PARRA, M.-V. SPELLER, N. TERRASSE, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Creatoprint
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Émilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement: Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées
PEFC
pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte : une lettre de « bienvenue aux abonnés » et les messages « L'Histoire » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ainsi que les encarts « Linvoges » et « Fashion » jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.

Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

CCF
BANQUE

LES MEILLEURS PRODUITS D'INVESTISSEMENT

sélectionnés pour vous

Au Crédit Commercial de France, notre indépendance nous permet de sélectionner pour vous **les meilleurs partenaires parmi les plus grandes institutions financières** telles que Eurazeo, HSBC Asset Management, Morgan Stanley, Pictet Asset Management et Rothschild & Co Asset Management.*

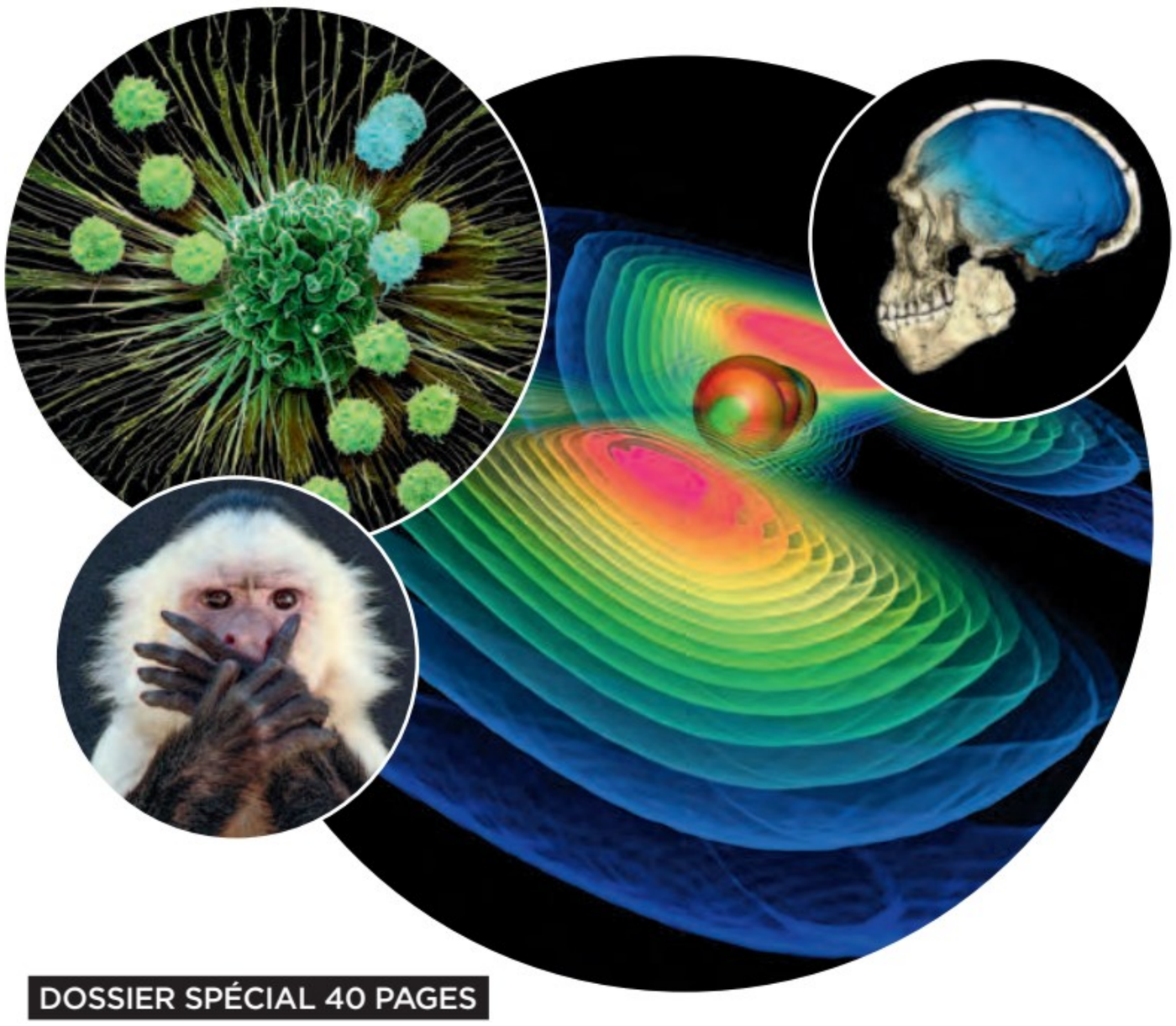
Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

*CCF n'a pas de lien capitalistique avec une société de gestion appartenant au même groupe financier. CCF entretient des liens économiques avec les partenaires sélectionnés. CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr).

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 941-942 / Juillet-Août 2025



DOSSIER SPÉCIAL 40 PAGES

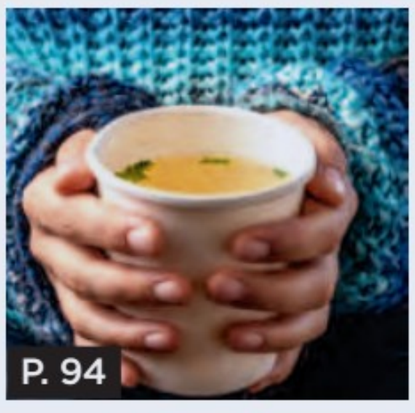
25 ans de grandes découvertes

Le premier quart du XXIe siècle a été riche en avancées scientifiques, de la physique à la génétique en passant par l'IA. Retrouvez dans notre grand dossier de l'été notre sélection de découvertes (p. 26), mais aussi celles espérées à l'horizon 2050 (p. 54), sans oublier six pages de jeux (p. 62).

P. 68

Planète 9 : après la théorie, l'heure de l'observation

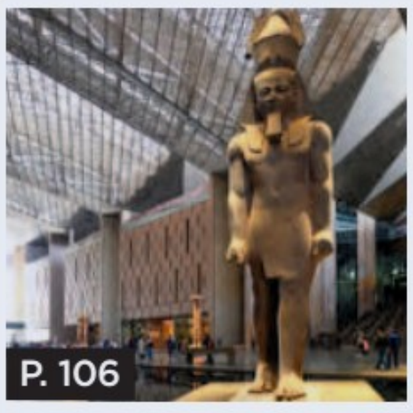
Le nouvel observatoire Vera-Rubin va peut-être mettre en évidence cette 9e planète dont des astronomes suspectent l'existence dans les parties les plus éloignées du Système solaire.



P. 94

Jeûne : quels effets protecteurs pour la santé ?

Des études montrent que la restriction calorique, en agissant sur le métabolisme, a des effets positifs sur le système cardio-vasculaire, le niveau de cholestérol ou le risque de diabète.



P. 106

Égypte : un écrin pour la civilisation pharaonique

Le Grand Musée égyptien du Caire, ouvert depuis octobre, sera inauguré en fin d'année. Reportage dans ce lieu majestueux qui abrite 15 000 œuvres dont le célèbre trésor de Toutankhamon.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

6 **Courrier**

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Muons : la fin d'une anomalie qui faisait rêver / Un habitat sous-marin imprimé en 3D

68 **Planète 9 : après la théorie, l'heure de l'observation**

74 **Le mystère persistant des black-out électriques**

76 **Quand la paille défie le béton**

80 **Journal de l'IA : Le Web assiégé par les robots de l'IA**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Starfish, un baromètre santé pour l'océan / Ces fleurs choisissent leurs visiteurs à l'oreille

82 **Moustique-tigre, l'été de tous les dangers**

87 **L'origine énigmatique des séismes de Santorin**

90 **La météo agricole, outil clé des récoltes**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Un médicament contre l'apnée du sommeil / Des avancées majeures au congrès sur le cancer

94 **Jeûne : quels effets protecteurs pour la santé ?**

100 **Covid 19 : la piste de l'accident de laboratoire**

104 **Nutrition : L'olive sous toutes ses formes**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Athéna à l'ombre du Parthénon / Le dernier repas du sauropode

106 **Égypte : un écrin majestueux pour la civilisation pharaonique**

112 **Francesco d'Errico, anthropologue : « Le corps est un objet culturel depuis plus de 500 000 ans »**

114 **Histoire des sciences : Giordano Bruno, un regard sur l'infini**

117 **Le grand tri des vestiges de Notre-Dame de Paris**

TRANSVERSALES

120 **Sélection livres**

122 **Expositions**

124 **Les ciels de juillet et d'août**

126 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

128 **Questions de lecteurs**

130 **Jeux**

STEVE GSCHMEISSNER/ SPL/ SUCRÉ SALÉ - RYAN MCVAY/ GETTY IMAGES - MAX PLANCK INSTITUTE - PHILIPP GUNZ, MPI EVA LEIPZIG - GETTY IMAGES - IGGI BOO /GETTY IMAGES - ANTOINE LORGNIER / HANS LUCAS.

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Comment Sapiens a conquis le monde »

(*Sciences et Avenir*, n° 940, juin 2025)

Merci pour ce dossier qui donne à réfléchir. L'histoire d'*H. sapiens* ne cesse de nous passionner. Concernant ses atouts, vous mentionnez la fécondité et l'explosion démographique qui en a résulté. Cependant, il me semble que les estimations de la fécondité devraient être tempérées par les estimations de la mortalité infantile. Il est admis que la mortalité avant 5 ans avoisinait les 50 % au Moyen Âge… Alors au paléolithique ? **Yves Lirette**

S. et A. : Merci de votre lecture attentive. Vous soulevez un point clé qui n'a pas été développé dans le dossier : la sédentarisation s'est accompagnée d'une détérioration générale de l'état de santé et d'une augmentation des mortalités infantiles, tandis que les naissances se sont plus rapprochées, rapporte Évelyne Heyer. Sont suspectées l'augmentation des portions de céréales au menu, déjà responsables de caries, et la densité de population. *« Un changement de régime alimentaire a des conséquences biologiques et s'accompagne de nombreux désordres, de type obésité, comme on le voit aujourd'hui »*, précise la chercheuse.

Sapiens l'envahisseur

Autre remarque : il est difficile de penser que *H. sapiens* aurait fait copain-copain avec Neandertal ou Denisova : le comportement de *H. sapiens* à notre époque nous donne à penser que ses conquêtes passées furent sans doute violentes… **Yves Lirette**

S. et A. : Vos remarques font écho à celles de Jean-Jacques Hublin, professeur au collège de France, qui juge que nous avons une nature invasive et pressons l'environnement, au détriment des autres espèces. Ce qui n'exclut pas la possibilité de commerces, d'échanges, ainsi qu'en témoignent des artefacts retrouvés chez *H. sapiens* et Neandertal.

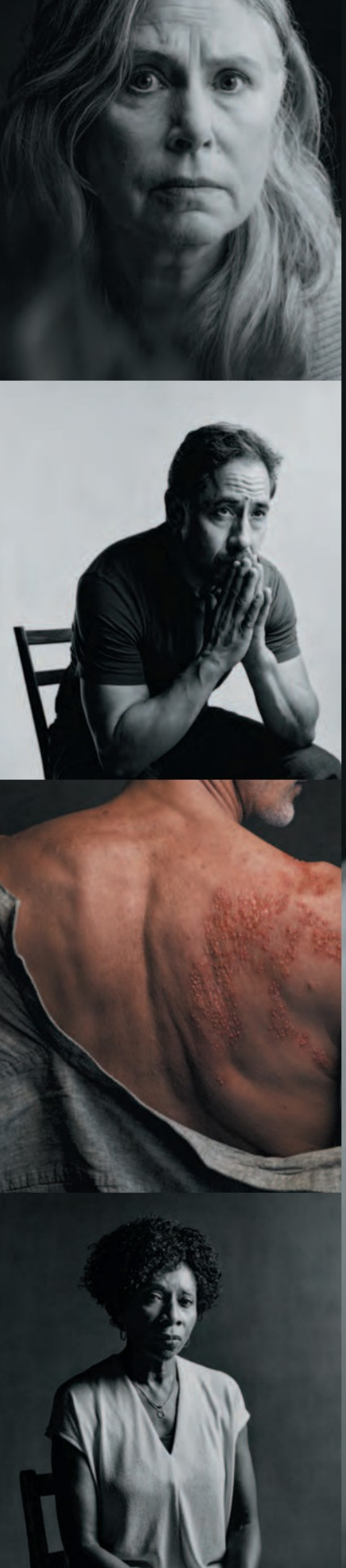
Notion d'espèce

Très intéressant sujet que la conquête du monde par *H. sapiens*. Je voudrais qu'on m'éclaircisse sur un point fondamental concernant la notion d'espèce. Lorsqu'on parle de pourcentage de gènes néandertaliens chez *H. sapiens*, cela veut dire que la spéciation n'est pas terminée, donc nous ne pouvons pas encore parler d'espèces différentes ! **Michel Meyzonnet**

S. et A. : Vu la divergence de nos génomes, Neandertal n'est pas une sous-espèce du genre *H. sapiens*. Nous appartenions bien à des espèces différentes du genre *Homo* lorsqu'environ 700 000 ans après avoir divergé de mêmes ancêtres, nous nous sommes rencontrés de nouveau, au Moyen-Orient, en Europe. Le ponte de la paléogénomique, Svante Pääbo, n'imaginait pas alors que nos deux espèces aient pu s'hybrider. Mais des échantillons d'ADN fossile lui ont montré que c'est possible. Ainsi les non-Africains portent 1 à 2 % de gènes néandertaliens aujourd'hui. Notre union n'a duré que 7000 ans, durant lesquels les deux espèces se sont mêlées, ont donné naissance à des métisses non viables ou non fertiles. Mais beaucoup de zones de notre génome, dépourvues de gènes néandertaliens, montrent que certains caractères de Neandertal ont dû être délétères pour *H. sapiens*. 70 % de son génome a été éliminé rapidement, dans une sorte de loterie génétique. Si l'essentiel du génome néandertalien a été « purgé » par l'évolution, c'est probablement parce qu'il représentait un désavantage sur le plan adaptatif.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture



GSK

" Le zona ?
Je ne veux plus
jamais revivre ça.
Je suis en bonne santé.

**Je ne pensais pas
que ça m'arriverait." ***

Plus de 90 % des 65 ans et plus sont déjà porteurs du virus responsable du zona.**

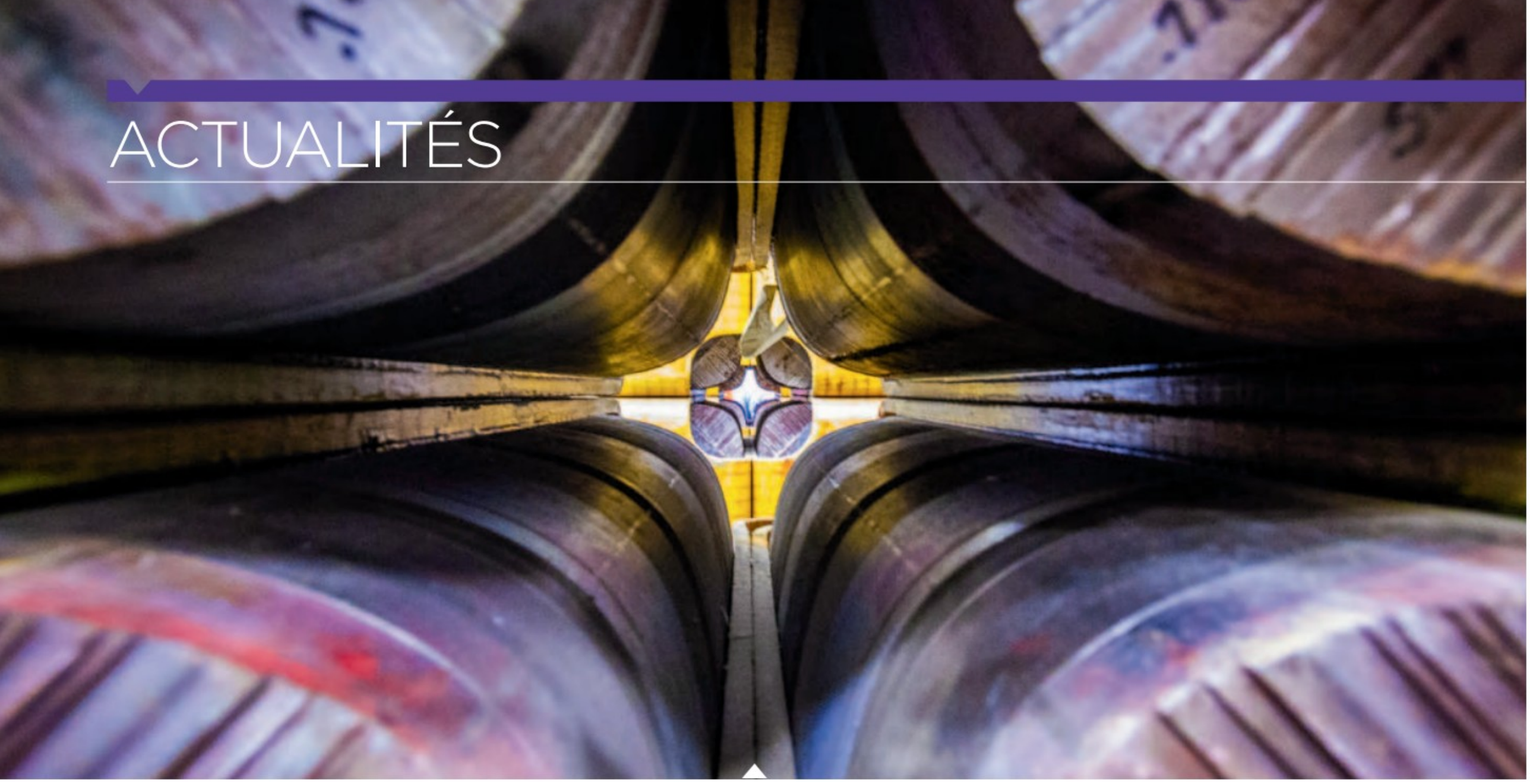
Parlez-en à votre médecin ou votre pharmacien dès aujourd'hui.

Plus d'informations sur
demain-sante.fr

*Comédiens relatant des témoignages de patients.

**Les personnes porteuses du virus ne développeront pas toutes un zona.

NP-FR-HZU-PRSR-240006 - Août 2024 © 2024 Groupe GSK ou ses concédants.



Aimant quadripolaire de l'anneau Muon g-2 au Fermilab, à Chicago (États-Unis), où s'est déroulée l'expérience cruciale.

Muons : la fin d'une anomalie qui faisait rêver

De nouveaux résultats indiquent que ces particules se comportent conformément au modèle standard, fermant la porte à une nouvelle physique.

CINDY ARNOLD/ FERMILAB

C'est une victoire au goût amer. Pendant plus de vingt ans, le comportement énigmatique du muon — ce cousin massif de l'électron, 200 fois plus lourd — a fait miroiter une fissure dans l'édifice du modèle standard de la physique des particules. Mais un nouveau calcul théorique, publié fin mai, aussitôt renforcé par une mesure expérimentale, vient de doucher tous les espoirs. La nouvelle physique que l'on espère tant découvrir pour répondre à des énigmes comme la matière noire ou l'énergie noire, attendra encore…

L'affaire commence en 2001 : une équipe du Laboratoire national de Brookhaven (États-Unis) observe que le muon tourne un peu plus vite que prévu par la théorie lorsqu'il est plongé dans un champ magnétique. L'écart est ténu, mais réel. Les campagnes de mesures menées ensuite au Fermilab, près de Chicago, confirment l'effet en 2021, avec une précision encore accrue en 2023. L'anomalie semble réelle, ce qui fait frémir la communauté des physiciens.

Car si le muon va trop vite, c'est peut-être qu'il interagit avec des particules inconnues, venues troubler sa danse. Or, les 17 particules du modèle standard ont déjà été prises en compte dans les équations. Si l'expérience s'en écarte, c'est qu'il manque des pièces au puzzle. Ce soupçon nourrit les hypothèses les plus audacieuses : particules inédites, forces insoupçonnées, dimensions cachées…

Le calcul théorique rejoint l'observation

Mais bientôt, le doute s'infiltre côté théorie. En cause : les effets « hadroniques », liés aux interactions entre quarks et gluons, qui sont complexes à modéliser. Jusqu'ici, ils étaient estimés à partir de données expérimentales indirectes. Une méthode concurrente, reposant sur des simulations numériques massives, offre un calcul autonome. Dès 2020, une estimation théorique, plus conforme aux mesures du Fermilab, émerge. À la fin de mai dernier, la collaboration Muon g–2 Theory Initiative affine cette approche, et obtient une valeur rigoureusement identique à celle mesurée. L'anomalie s'évapore puisque le calcul théorique rejoint l'observation. *« C'est une magnifique réussite théorique, mais je suis un peu triste »*, confie à la revue *Science* Aida El-Khadra, coordinatrice de l'étude, résumant bien l'état d'esprit des physiciens des particules. Une expérience japonaise testera bientôt le muon par une autre méthode. Mais certains estiment que la mesure sera moins précise, et donc peu susceptible de remettre en cause les conclusions actuelles. Le magnifique édifice du modèle standard semble donc plus solide que jamais. Hélas… ■ **F. N.**

Un habitat sous-marin imprimé en 3D

Ce prototype préfigure une station capable d'accueillir des missions scientifiques de longue durée.

DEEP R&D LTD

Sentinel pourra se positionner à plus de 200 mètres de profondeur et accueillir des chercheurs 80 jours d'affilée (vue d'artiste).

L'habitat sous-marin Vanguard, dont les composants sont en construction par la société Deep au Royaume-Uni, devrait être mis à l'eau dès cette année. Ce prototype, dont des composants métalliques de grande taille et complexes ont été imprimés en 3D, sera testé pour identifier les points faibles et étudier en conditions réelles la faisabilité de la vie prolongée sous la mer. L'objectif est de construire Sentinel, une version plus grande, qui permettra à des chercheurs d'effectuer des missions de longue durée d'exploration scientifique. Cela évitera les cycles répétés de compression et de décompression qui représentent un risque important lors des plongées prolongées. La station sera alimentée depuis la surface en air, électricité, eau potable et communications. Des séjours au long cours dans les fonds marins devraient permettre d'accélérer notre connaissance de ces milieux si mal connus. **S. R.**

EN DEUX MOTS

PHYSIQUE Au Cern, une expérience a transformé du plomb en or lors de quasi-collisions où les noyaux se frôlent, générant un champ magnétique qui arrache les trois protons menant à l'or, immédiatement désintégré. **SATELLITES** Pour concurrencer le réseau de Starlink, le géant américain Amazon s'apprête à envoyer les premiers satellites de sa constellation. **ASTROPHYSIQUE** Une « galaxie monstre » de 10 fois la masse de la Voie lactée a été observée alors que l'Univers n'avait que 2,6 milliards d'années, inattendue pour cette époque.

GETTY IMAGES

Un couteau bien affûté permet de diminuer la libération des composés soufrés.

Couper les oignons sans pleurer

PHYSIQUE Lorsque vous coupez des oignons, ne le faites pas trop rapidement et utilisez surtout un couteau bien aiguisé. Les composés soufrés contenus dans les bulbes, si irritants pour les yeux, seront libérés alors en quantités moindres, assurent des physiciens américains. Grâce à une caméra haute vitesse, ils ont constaté qu'une lame bien affûtée projette 40 fois moins de liquide lacrymogène que si elle est émoussée. Une découpe rapide multiplie également par quatre les particules irritantes. **F. D.**

SOURCE : Z. WU, UNIVERSITÉ CORNELL, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

« La fin de l'Univers arrive beaucoup plus tôt que prévu »

Heino Falcke, astrophysicien à l'université Radboud de Nimègue (Pays-Bas) dont l'équipe a recalculé l'espérance de vie du cosmos… Il ne resterait « que » 10^{78} années au lieu des 10^{1100} estimées jusqu'ici avant que les dernières naines blanches — corps célestes les plus durables — ne finissent de s'éteindre.

Sursis inespéré pour Voyager 1

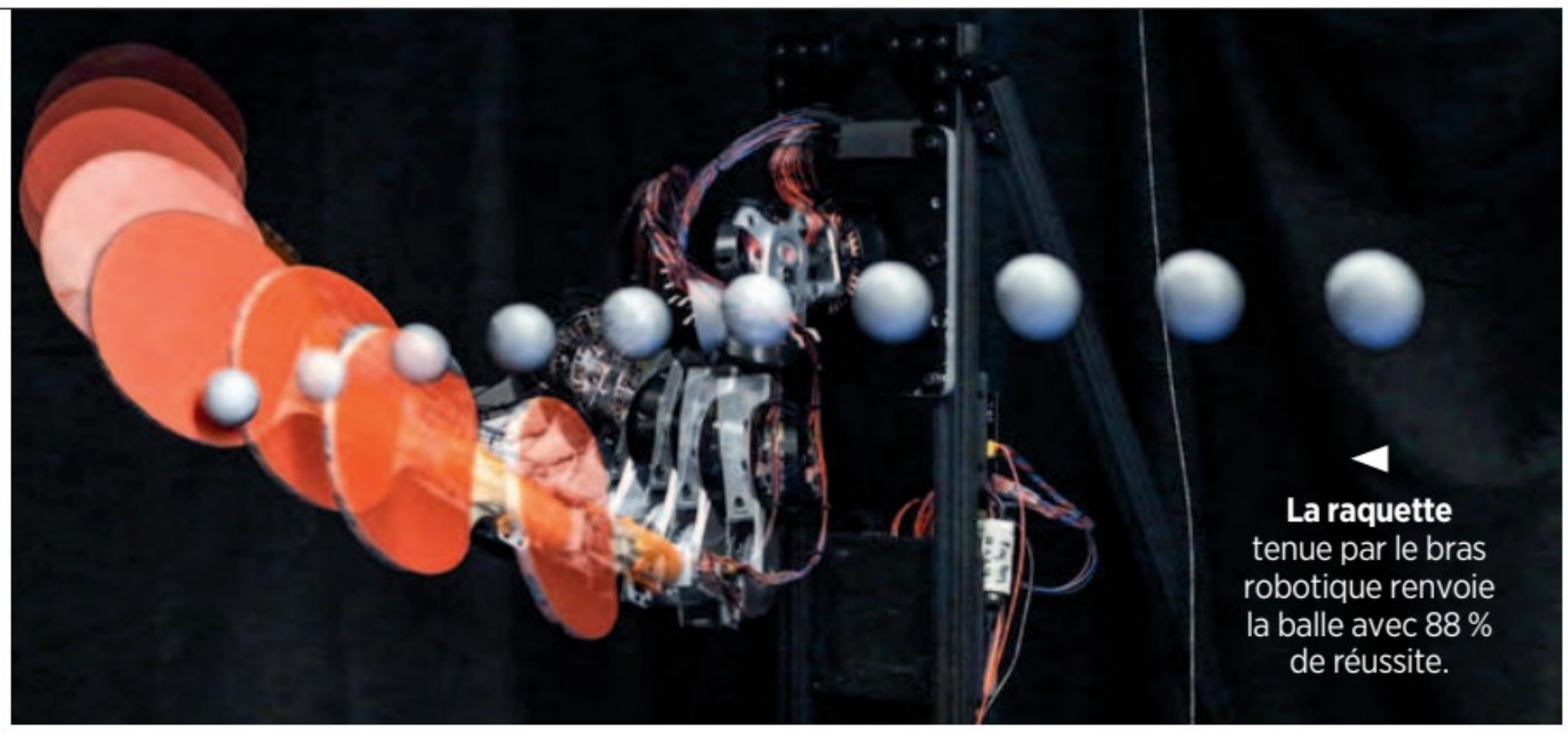
BRIDGEMAN IMAGES

La sonde spatiale a été lancée en 1977 (vue d'artiste).

INGÉNIERIE *« C'est un nouveau miracle pour Voyager 1 »*, jubile Todd Barber du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa. Grâce à l'habileté de ses ingénieurs, l'un des jeux de propulseurs de la mythique sonde spatiale lancée en 1977 pour explorer le Système solaire externe a pu être réparé… alors que le vaisseau se trouve actuellement à 25 milliards de kilomètres de notre planète, dans l'espace interstellaire ! Ces moteurs tombés en panne en 2004 jouent un rôle crucial : c'est grâce à eux que Voyager 1 oriente son antenne vers la Terre, lui permettant de recevoir des commandes et transmettre des données. **F. D.**

L'aimant le plus puissant du monde

PHYSIQUE Pesant plus de 1000 tonnes et mesurant 18 mètres de haut, l'aimant supraconducteur le plus puissant du monde est prêt à être installé sur le site du projet Iter, à Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône). Il constituera le cœur magnétique de cette machine expérimentale où un plasma chauffé à 150 millions de degrés produira dans les années 2030 des réactions de fusion nucléaire. Cet aimant gigantesque — si puissant qu'il pourrait soulever un porte-avions ! — servira à chauffer et contrôler le plasma. **F. D.**



D. NGUYEN, K. D. CANCIO, S. KIM

La raquette tenue par le bras robotique renvoie la balle avec 88 % de réussite.

Un robot pongiste aussi vif qu'un humain

ROBOTIQUE Il ne faut que 7,5 à 16 millisecondes à ce bras robotique articulé pour réagir à trois types de frappes : coup droit, coupé ou lift (effet de rotation). Sur un total de 150 balles pour chaque effet, le robot pongiste a été capable d'en renvoyer avec succès 88 % en moyenne. Et ce, grâce aux données de six caméras suivant les trajectoires et positions de la balle, qui permettent de calculer la réaction adéquate en un temps record. **A. D.**

SOURCE : DAVID NGUYEN, MIT, ÉTATS-UNIS.

À VOIR SUR LE NET

UNIVERSITY OF TSUKUBA

Le chant des cigales contrôlé par électrodes

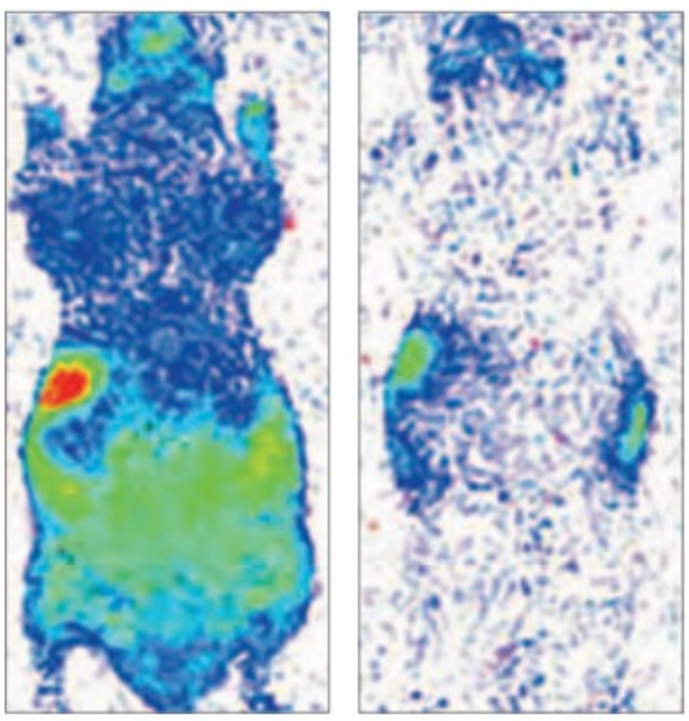
CYBORG Des cigales qui « jouent » le *Canon* de Pachelbel ! C'est ce qu'on peut entendre sur cette vidéo produite par une équipe japonaise de l'université de Tsukuba. Celle-ci a inséré des électrodes dans les muscles qui contrôlent l'organe afin d'obtenir les contractions voulues à partir d'un ordinateur. Le son est, lui, naturellement produit par les vibrations et amplifié par son abdomen servant de caisse de résonance **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les êtres vivants ont une aura de photons

Des chercheurs ont démontré l'existence de cette lumière émise par la libération de biophotons.

Tous les organismes vivants émettent naturellement une faible lueur, qui s'éteint à leur mort. Cette émission, nommée UPE (émission de photons ultrafaibles), est issue de réactions chimiques impliquant l'oxygène. Longtemps controversée, elle est aujourd'hui prouvée scientifiquement. Une équipe canadienne l'a observée chez des souris, avant et après leur mort : la lumière, émise par la libération de biophotons dans la gamme du visible au proche infrarouge, s'interrompt peu après l'arrêt des fonctions vitales, confirmant son origine biochimique. Pour la détecter, les chercheurs ont utilisé des capteurs ultrasensibles, en excluant les rayonnements émis par la chaleur. Ils montrent également que chez les plantes, la lueur s'intensifie en situation de stress. Cette lumière générée par chimioluminescence pourrait devenir un outil précieux pour des diagnostics médicaux non invasifs et une surveillance de la santé des écosystèmes. **E. T.**



SALARI ET AL.

L'intensité de la lumière produite par cette souris vivante (à gauche) s'est rapidement estompée après sa mort (à droite).

DONNER AUX JEUNES L'ÉNERGIE D'IMAGINER CELLE DE DEMAIN.

ENGIE, avec le concours « Science Factor », accompagne les collégiens et lycéens pour les aider à développer des projets scientifiques innovants et leur permettre de s'engager pour la transition énergétique.

Pour favoriser l'impact positif de chacun sur la société, agissons ensemble.

Impact Together for society*

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Développons ensemble un impact plus positif pour la société.
Découvrez le programme Impact Together d'ENGIE sur engie.com/groupe/sponsoring-partenariats
Plus d'informations sur sciencefactor.fr

ENGIE : SA AU CAPITAL DE 2435285011€ - RCS NANTERRE 542107651. © Getty Images.

Starfish, un baromètre santé pour l'océan

Cette première édition, établie à l'occasion de la Conférence des Nations unies sur l'océan à Nice, alerte sur des signaux critiques.

Un nouvel outil scientifique à destination des décideurs a été publié à la veille de l'ouverture de la Conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc) qui s'est tenue à Nice du 9 au 13 juin. Fondé exclusivement sur des données validées par la communauté scientifique internationale, ce premier bulletin de santé de l'océan sera réactualisé chaque année. En forme d'étoile de mer dont chaque branche concerne un paramètre clé de la santé des océans (pressions humaines, opportunités, efforts de protection, etc.), il doit donner une image globale aussi compréhensible que possible. Cette première édition alerte sur des signaux critiques.

1677 espèces marines menacées d'extinction

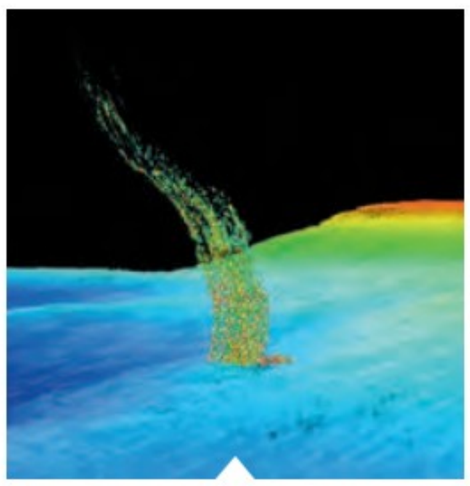
Depuis 1901, en effet, le niveau des mers a augmenté de 23 cm, leur température est la plus élevée depuis 60 ans, et la biodiversité s'effondre : 1677 espèces marines sont menacées d'extinction, dont un tiers des requins, raies et chimères et 26 % des cétacés. Les récifs coralliens ont subi un quatrième épisode mondial de blanchissement l'an passé, et près de la moitié des espèces de coraux sont menacées d'extinction.

Autant d'événements directement dus aux activités humaines. Les émissions de CO_2 fossile ont atteint 37,4 milliards de tonnes en 2024 et la surpêche progresse : près de 38 % des stocks marins étaient surexploités en 2021, contre 10 % en 1974. Depuis 1950, la désoxygénation côtière a été multipliée par dix, la moitié des mangroves et herbiers marins sont en voie de disparition, et 33 % des côtes sableuses ont dans le même temps été artificialisées.

Avec une production 200 fois plus importante qu'en 1950, la pollution plastique explose et représente plus de 80 % des déchets aquatiques, avec jusqu'à 199 millions de tonnes accumulées dans les océans et les rivières en 2021. Plus de 1200 espèces marines en souffrent directement. Bref, il faut espérer que le baromètre fasse son effet auprès des décideurs pour apporter des nouvelles positives dans les années qui viennent. ■ **S. R.**

Organisé en 5 branches, comme une étoile de mer, le baromètre décline pour chaque grand axe les quatre informations clés validées par la communauté scientifique (www.starfishbarometer.org).

STARFISH BAROMETER



UNIVERSITY OF WASHINGTON

Bulles de méthane émanant du fond marin, détectées par sonar.

À l'assaut des « glaces de feu »

CLIMATOLOGIE La Chine a lancé en début d'année un programme de recherche dédié à la cartographie des émanations de méthane libérées par les fonds marins — aussi appelées glaces de feu. Pour cela, elle a annoncé développer un laboratoire profond, capable de descendre à 2000 m pour 30 jours avec six personnes à son bord. Depuis leur découverte en 1983, ces infiltrations froides ont été identifiées sur la plupart des marges continentales, y compris en Antarctique. Or, nous ne savons presque rien de leur répartition dans les océans. **S. R.**

IL A DIT

« Un hectare de mangroves stocke cinq fois plus de carbone qu'un hectare de forêt »

Sachooda Ragoonaden, président de l'Association pour le développement durable à l'île Maurice, a plaidé en faveur de la restauration des écosystèmes côtiers végétalisés source de « carbone bleu », soit le carbone capté et stocké par ces environnements. De premiers crédits ont été délivrés en ce sens lors de l'Unoc.

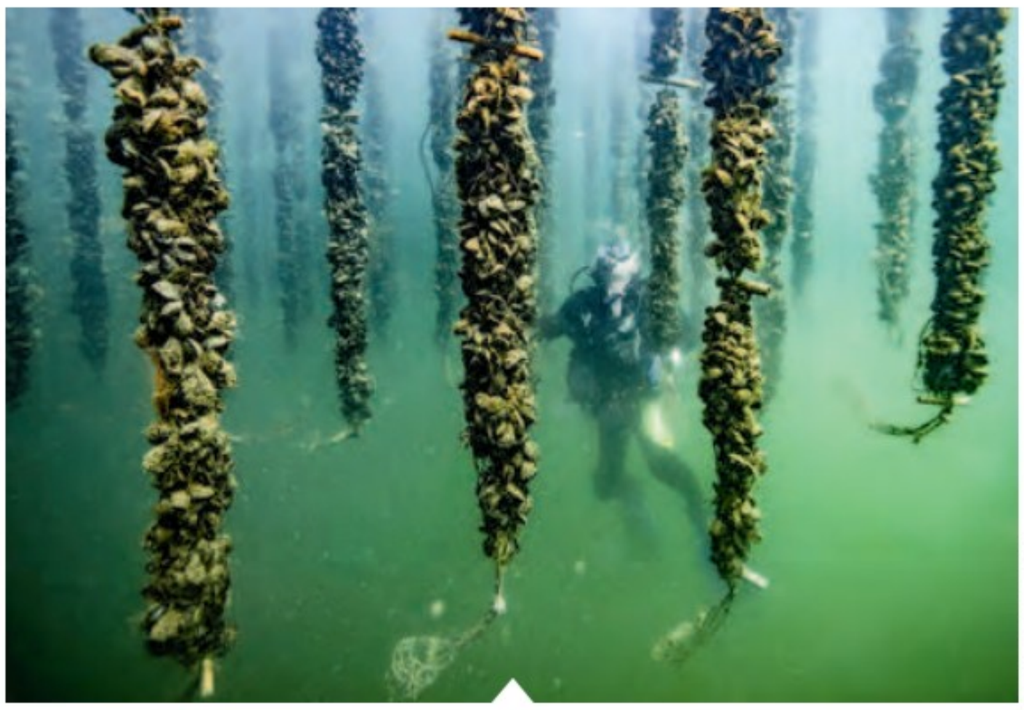
Les modules sont inspirés des mangroves, de la rugosité des fonds rocheux et de l'enchevêtrement des herbiers marins.

LINEUP OCEAN

Des brise-lames en coquilles d'huître

Ce dispositif atténue les vagues et crée de la vie marine autour de ses structures en alvéoles.

Protéger les littoraux de l'érosion grâce à des récifs imprimés en 3D à partir de coquilles d'huître. C'est le défi que s'est lancé Robin Alauze, océanographe et ingénieur en écologie marine, fondateur de la start-up montpelliéraine LineUp Ocean, présente à l'Unoc. L'objectif est double : atténuer les vagues sans les bloquer et créer de la vie marine à partir d'un nouveau matériau. Les structures en alvéoles immergées rendent le dispositif facilement colonisable. *« Inspiré de la tortuosité des mangroves, de la rugosité des fonds rocheux et de l'enchevêtrement des herbiers marins, ce module a les qualités de trois écosystèmes naturels qui participent à la résilience côtière »*, assure Robin Alauze. Autant d'atouts qui font défaut aux digues classiques, dont la rigidité empêche en outre l'accrétion naturelle des sédiments et par conséquent la formation de plages et de dunes. Alors qu'un site pilote est installé depuis deux ans à 200 m de la plage de Palavas-les-Flots (Hérault), la start-up cherche désormais à étendre ses expérimentations sur d'autres façades littorales. **O. D.**



BORIS HORVAT / AFP

L'acidification des mers et leur réchauffement sont délétères pour les organismes marins à coquille de calcaire comme les moules.

Les moules menacées de disparition d'ici à 2100

BIODIVERSITÉ L'acidification des océans menace la survie des moules dans les prochaines décennies, comme en témoigne une étude présentée à l'Unoc. Elle a été menée à l'aide d'un conteneur installé près de la lagune de Thau (Hérault). Des huîtres et des moules y ont été élevées en conditions naturelles, l'eau prélevée en continu étant seulement augmentée de 1 °C et légèrement acidifiée. Résultat : 40 % de production en moins chez les huîtres, et un effondrement total chez les moules en à peine 18 mois. **S. R.**

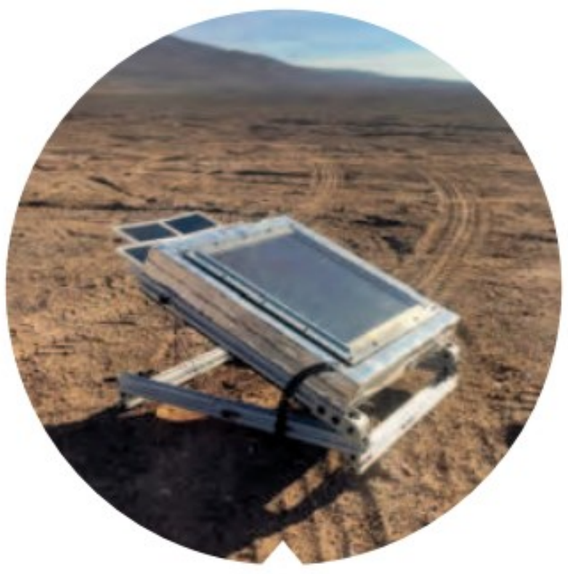
96 Le nombre d'États signataires d'une déclaration anti-plastique

POLLUTION À l'approche de négociations qui se tiendront en août 2025 à Genève (Suisse), l'Unoc a enregistré une volonté politique inédite de 96 pays en faveur de mesures fortes, y compris contraignantes, pour réduire la pollution plastique. La déclaration signée porte sur l'ensemble du cycle de vie du plastique, en particulier sur la réduction de la production. **H. J.**

Récupérer de l'eau dans le désert d'Atacama

INGÉNIERIE Une équipe d'ingénieurs a développé un nouveau récupérateur d'eau atmosphérique. Il contient un hydrogel mélangé à du chlorure de lithium qui piège l'eau présente dans l'air ambiant durant la nuit. En journée, l'eau est extraite de l'hydrogel grâce à l'énergie d'un panneau solaire relié au dispositif. L'équipe a ainsi pu récolter plus d'un demi-litre d'eau en 12 heures dans le désert d'Atacama (Chili), un des lieux les plus arides de la planète. **B. B.**

SOURCE : CHAD WILSON, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.



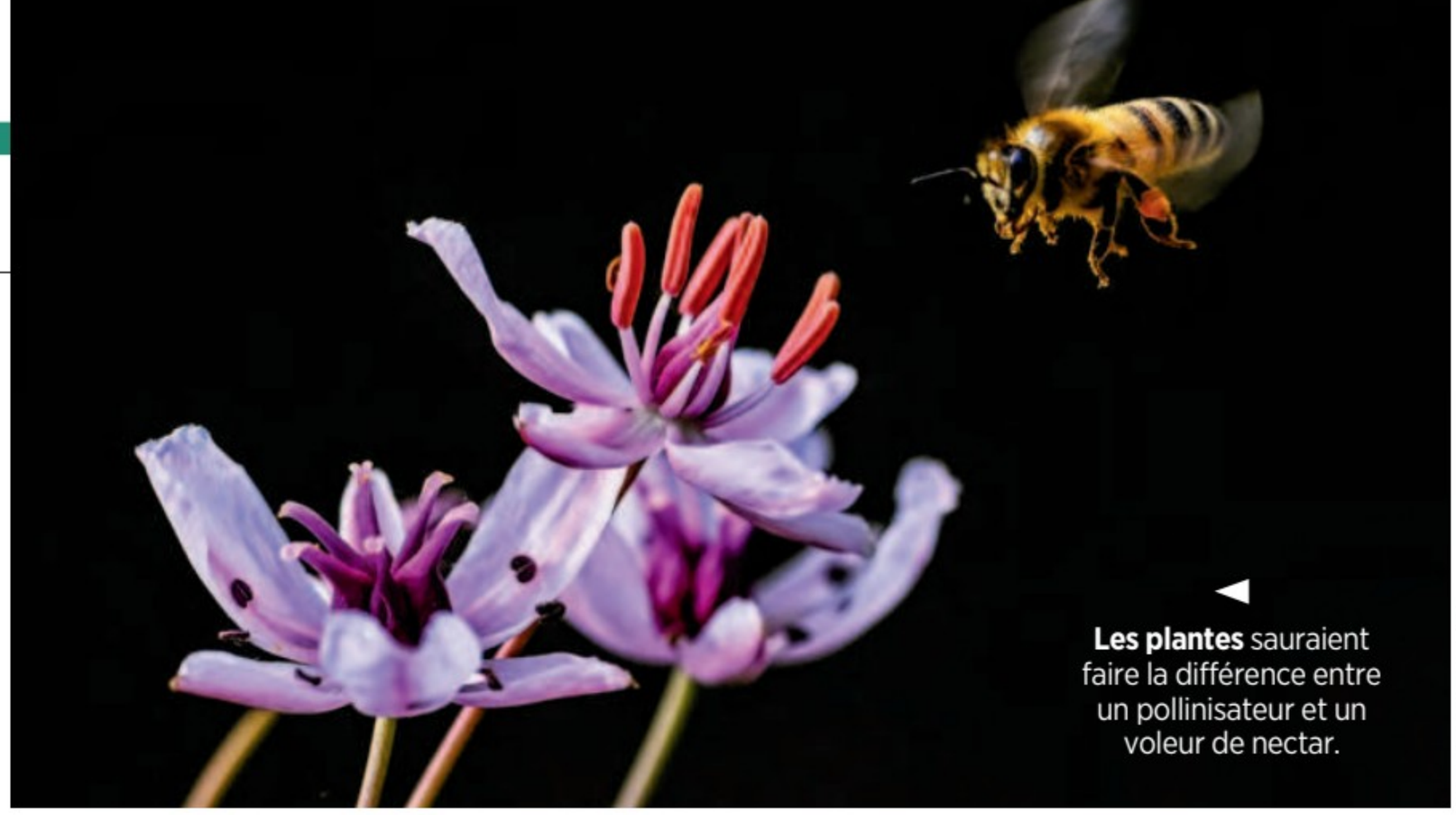
CHAD TWILSON

Le dispositif capte l'eau présente dans l'air durant la nuit grâce à l'énergie solaire du désert chilien.

Les rivières déstockent un carbone millénaire

ENVIRONNEMENT Une étude révèle que 60 % du carbone charrié par les fleuves et rivières a un âge qui se compte en milliers d'années, et non en quelques décennies, comme le postulaient jusqu'ici les modèles climatiques. Une mauvaise nouvelle, puisqu'il leur faudra ajouter 1,2 milliard de tonnes de carbone relâché. Une part issue du lessivage des sols et de leur érosion. **L. C.**

SOURCE : JOSHUA DEAN, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.



Les plantes sauraient faire la différence entre un pollinisateur et un voleur de nectar.

S. VITZTHUM/BIOSPHOTO

Ces fleurs choisissent leurs visiteurs à l'oreille

Une étude montre que les plantes reconnaissent les bourdonnements des insectes butineurs et adaptent leur production de nectar à leur approche.

Les plantes ne sont pas sourdes : même sans système nerveux, elles savent faire la différence entre un pollinisateur et un voleur de nectar, simplement au son de leur bourdonnement. Une étude présentée à l'Acoustical Society of America révèle que le muflier (*Antirrhinum litigiosum*) augmente sa production de nectar à l'approche d'abeilles pollinisatrices efficaces. À l'inverse, les plantes restent économes et produisent un nectar moins riche en sucre face aux insectes opportunistes, qui ne pollinisent pas. En diffusant des sons de différents insectes autour des fleurs, les chercheurs ont même observé des changements dans l'expression génétique liée à la composition du nectar. Cette capacité d'écoute vibro-acoustique témoigne d'une stratégie évolutive des plantes, qui pourraient optimiser leurs ressources en favorisant les insectes les plus utiles à leur reproduction. **E. T.**

Le comportement des chiens de berger est dans leurs gènes

GÉNÉTIQUE L'aptitude des chiens de berger à rassembler un troupeau est liée à plusieurs gènes du développement nerveux, révèle une étude américano-coréenne. La comparaison du génome d'une centaine de races, dont 12 spécialisées dans le gardiennage, a permis d'identifier chez celles-ci une vingtaine de gènes caractéristiques, eux-mêmes impliqués dans le potentiel cognitif humain. La propension du border collie à interagir avec son maître a même été associée au gène nommé EPHB1. **P. K.**

THOMAS LOUAPRE/DIVERGENCE

IL A DIT

« Aux États-Unis, nous avons des centaines de types de réacteurs et un seul type de fromage. En France, c'est l'inverse »

Jess Gehin, directeur associé du Laboratoire national de l'Idaho (États-Unis), centre de recherche nucléaire, commentant dans *Le Monde* le foisonnement de nouveaux projets de petits réacteurs nucléaires (SMR) outre-Atlantique.

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année plus de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2024.

2024. Agence Marcel - © Yann Le Pape

GETTY IMAGES

Le masque respiratoire, très contraignant, est actuellement le principal moyen pour lutter contre l'apnée obstructive du sommeil.

Un médicament contre l'apnée du sommeil

Les interruptions de la respiration nocturne seraient réduites en stimulant le tonus musculaire du pharynx.

La ventilation forcée avec un masque respiratoire à porter la nuit est aujourd'hui le principal traitement contre les apnées du sommeil. Mais un moyen beaucoup moins contraignant se profile avec un médicament pouvant réduire, voire supprimer ces interruptions de la respiration nocturne. C'est ce qu'a annoncé la start-up américaine Apnimed, dont la solution médicamenteuse AD109 est testée dans un essai clinique incluant 646 patients. Le traitement repose sur la combinaison de deux molécules déjà sur le marché : l'une stimulant le tonus musculaire du pharynx, l'autre diminuant sa réduction au cours du sommeil. De fait, l'apnée du sommeil obstructive se produit lorsque le relâchement des tissus au niveau du pharynx en position couchée bloque le passage de l'air vers les poumons. Outre des ronflements sonores, elle occasionne un sommeil perturbé par des microréveils, une mauvaise oxygénation de l'organisme et, donc, une plus grande sollicitation du cœur. À la longue, cette hypoxie favorise l'hypertension, contribue à diverses pathologies cardiovasculaires et fait diminuer l'espérance de vie.

Un deuxième essai est prévu cet été

Selon les résultats préliminaires communiqués par la start-up, le syndrome a pu être significativement atténué dans 56 % des cas traités dans l'essai clinique, et même résolu pour 22 % des patients. Ses effets indésirables sont un dessèchement de la bouche et une insomnie dans un quart des cas. De quoi se libérer du masque respiratoire dit de pression positive continue (PPC) ? *« Ce type de traitement sera peut-être intéressant pour les patients ne supportant pas la PPC, très symptomatiques et qui n'ont pas des formes sévères »*, précise Maxime Patout, pneumologue expert à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Car trop souvent, le traitement prescrit à 1,6 million de personnes en France est si mal toléré qu'il est laissé de côté…
Quoi qu'il en soit, un deuxième essai à grande échelle du AD109 devrait s'achever cet été. Et permettre à Apnimed de déposer une demande d'approbation auprès de l'agence américaine du médicament (FDA) d'ici à début 2026. ■ **P. K.**

57 millions

Le nombre de dossiers médicaux pour une IA

SANTÉ PUBLIQUE Foresight, une intelligence artificielle (IA) générative de type chatGPT, est en cours d'entraînement sur un ensemble de données record issu du système de la santé publique britannique (NHS). Ce projet pilote inédit, mené par le King's College de Londres, analyse les dossiers médicaux anonymisés de quelque 57 millions de personnes en Angleterre. **H. J.**

L'entorse nécessite toujours une consultation

ORTHOPÉDIE Une entorse cet été ? Vite, consultez dans les 24 heures un médecin ou un kiné, recommande la Haute Autorité de santé. Les entorses de cheville sont en effet trop souvent banalisées, alors qu'elles peuvent causer des problèmes durables si elles sont mal soignées : instabilité dans 40 % des cas, source de récidive et d'arthrose. D'où l'importance d'un examen rapide pour prévoir, ou non, une rééducation. Reste à trouver un rendez-vous. **S. R-M.**

VOISIN/PHANIE

Mal soignées, les entorses de cheville provoquent une instabilité dans 40 % des cas.

Conception : Agence Bastille / Crédits photos : Julie Cherki / Marie Curie : photo Wyndham Edit. Source : Musée Curie (coll. ADIC) – Photomontage : Ingraphite

TRANSMETTRE L'ESPOIR DE VAINCRE LE CANCER

LÉGUER TOUT OU PARTIE DE SES BIENS À L'INSTITUT CURIE, 1ER CENTRE FRANÇAIS DE RECHERCHE EN CANCÉROLOGIE, EST UN FORMIDABLE MESSAGE D'ESPOIR.

AGISSEZ AVEC NOS CHERCHEURS POUR LES GÉNÉRATIONS À VENIR.

institut Curie

LEGS – DONATION – ASSURANCE-VIE

curie.fr **Pour tout renseignement** Institut Curie - direction des relations donateurs : 26, rue d'Ulm - 75248 Paris CEDEX 05 - 01 56 24 55 34 - legs@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter et à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A 072025

ELLE A DIT

« Les antidépresseurs rendent les lymphocytes plus heureux dans l'environnement oppressant d'une tumeur »

Lili Yang, professeure d'immunologie à l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis), dont les travaux montrent que la plus grande disponibilité en sérotonine — « hormone du bonheur » — permise par ces médicaments améliore aussi la capacité des cellules immunitaires à combattre le cancer.

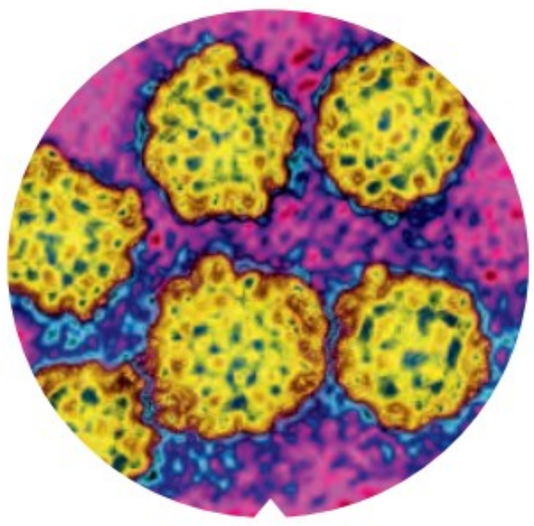
GETTY IMAGES

Les sillons visibles sur les doigts après un long bain sont dus à la rétraction des vaisseaux sanguins.

Les doigts mouillés forment toujours les mêmes rides

Cette découverte établie par des chercheurs aux États-Unis pourrait avoir des applications en biométrie.

Les doigts se plissent toujours de la même manière en restant longtemps dans l'eau. Telle est la conclusion des chercheurs du département biomédical de l'université de Binghamton (États-Unis). Ils ont demandé à trois participants de plonger leur main droite dans de l'eau à 40 °C pendant une demi-heure. Les doigts ont ensuite été photographiés et la même opération a été répétée 24 heures plus tard. Les analyses mathématiques indiquent un fort score de similitude entre les photos, suggérant que les rides sont identiques. Mais avec seulement trois participants, l'étude doit être confirmée sur un échantillon plus large. Et chacun pourra s'amuser à vérifier la chose cet été au bord de l'eau. Si elle est avérée, cette découverte pourrait avoir des applications en biométrie. Elle pourrait aider la police scientifique dans l'identification des corps noyés ou la reconnaissance des empreintes digitales. Mais aussi permettre de manipuler des écrans avec les doigts mouillés. **B. B.**



SPL/SUCRÉSALÉ

Les norovirus sont très contagieux.

Vers un vaccin contre la gastro-entérite

INFECTIOLOGIE Un vaccin oral a été mis au point contre les norovirus, première cause virale de gastro-entérite chez l'adulte. Dans un essai de phase 2, il a réduit les cas de gastro-entérite de 21 % en comparaison d'un groupe placebo. La présence du virus dans les selles, principale source de contamination, a chuté de même que les vomissements. La durée de cette immunité acquise reste cependant à déterminer. **P. K.**

SOURCE : BECCA FLITTER, VAXART, ÉTATS-UNIS.

CHILDREN'S HOSPITAL OF PHILADELPHIA

Le gène défectueux du nourrisson a été corrigé en utilisant Crispr-Cas9.

Première thérapie génique sur mesure

GÉNÉTIQUE **Un bébé atteint d'une maladie génétique rare empêchant son foie d'évacuer l'ammoniac est devenu le premier patient au monde à bénéficier d'une thérapie génique sur mesure fondée sur la technique Crispr-Cas9** *(lire aussi p. 48)*, **a annoncé une équipe de l'hôpital pour enfants de Philadelphie (États-Unis). La correction du gène défectueux est passée par l'administration de nanoparticules dans le foie du jeune K. J. Muldoon. H. J.**

Un cinquième type de diabète

DIABÉTOLOGIE La Fédération internationale du diabète (FID) vient de reconnaître officiellement l'existence d'un diabète de type 5, spécifiquement lié à la malnutrition. Généralement diagnostiquée à tort comme un diabète de type 1, cette pathologie se manifeste chez des personnes de faible poids, présentant un déficit de production en insuline probablement en raison d'un développement anormal du pancréas. Elle concernerait entre 20 et 25 millions de personnes dans le monde. **S. R.-M.**

Lire le ciel

Sous les étoiles en Méditerranée

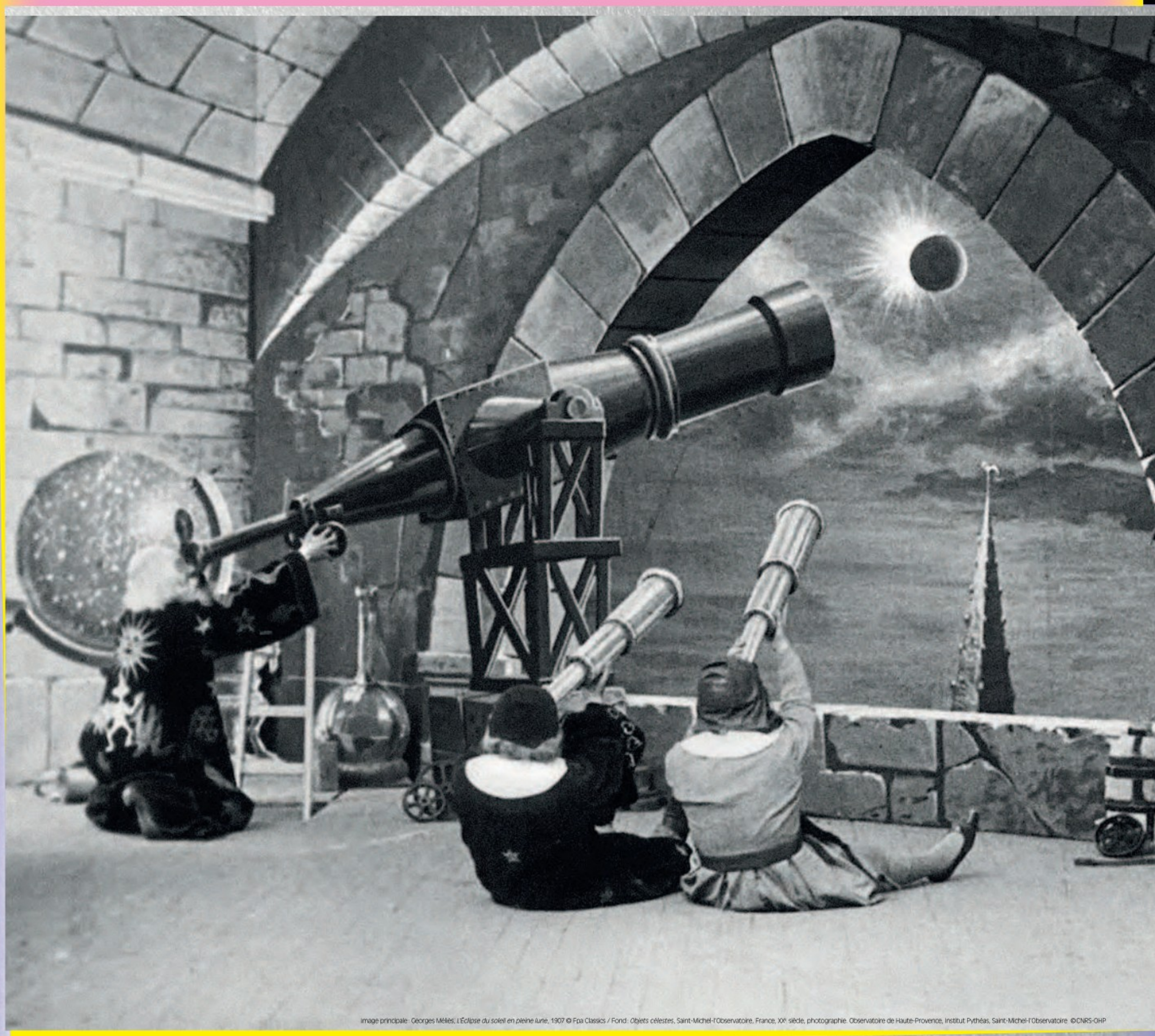


Image principale : Georges Méliès, *L'Éclipse du soleil en pleine lune*, 1907 © Fpa Classics / Fond : *Objets célestes*, Saint-Michel-l'Observatoire, France, XXe siècle, photographie. Observatoire de Haute-Provence, Institut Pythéas, Saint-Michel-l'Observatoire. ©CNRS-OHP

Mucem

Exposition
9 juillet 2025—5 janvier 2026

MINISTÈRE DE LA CULTURE
Liberté
Égalité
Fraternité

Avec le soutien de
bertin technologies

Avec la participation exceptionnelle du musée du Louvre
LOUVRE

Partenariats médias
Libération · arte · Konbini · France Culture · Sciences Avenir · rfi · France 24 · MCD · France médias monde · La Provence · ici Radio TV Digital

YUQIAN MA, Y. CHEN, H. ZHAO

Des nanoparticules ont été intégrées au verre de contact.

Ces lentilles offrent une vision infrarouge

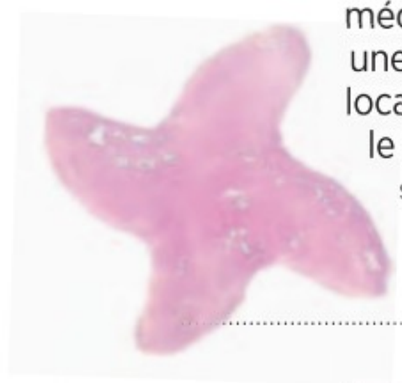
OPHTALMOLOGIE **En introduisant un cocktail de nanoparticules dans des lentilles de contact classiques, une équipe chinoise a mis au point un dispositif capable de capter la lumière infrarouge pour la convertir en lumière du spectre visible. Testées sur des volontaires, ces lentilles permettaient de percevoir des photons de grandes longueurs d'onde assez clairement pour capter des signaux de Morse. À terme, elles pourraient remplacer les encombrantes lunettes de vision nocturnes. M. P.**

SOURCE : YUQIAN MA, UNIVERSITÉ DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE CHINE.

Des implants imprimés en 3D

BIO-INGÉNIERIE Des implants biologiques ont été imprimés en 3D à l'intérieur du corps de rongeurs, sans chirurgie. Une bio-encre leur a été injectée, pouvant être solidifiée et manipulée grâce à des ultrasons. Ces structures *(photo)* pourraient être chargées de médicaments pour une libération localisée contre le cancer. **H. J.**

E. DAVOODI, W. GAO



SOURCE : E. DAVOODI, CALTECH, ÉTATS-UNIS.

La première greffe de vessie au monde

CHIRURGIE Alors que la greffe de rein se pratique depuis plus de 70 ans, la transplantation de vessie, jugée trop complexe, n'avait jusqu'ici jamais abouti. C'est désormais chose faite. Une équipe de l'hôpital Ronald-Reagan à Los Angeles (États-Unis) a opéré avec succès Oscar Larrainzar, 41 ans, qui vivait sous dialyse depuis plusieurs années. Il a reçu un rein et une vessie raccordés qui lui ont permis de se soulager naturellement peu après l'opération de huit heures. **H. J.**

N. CARRANZA/UCLA HEALTH

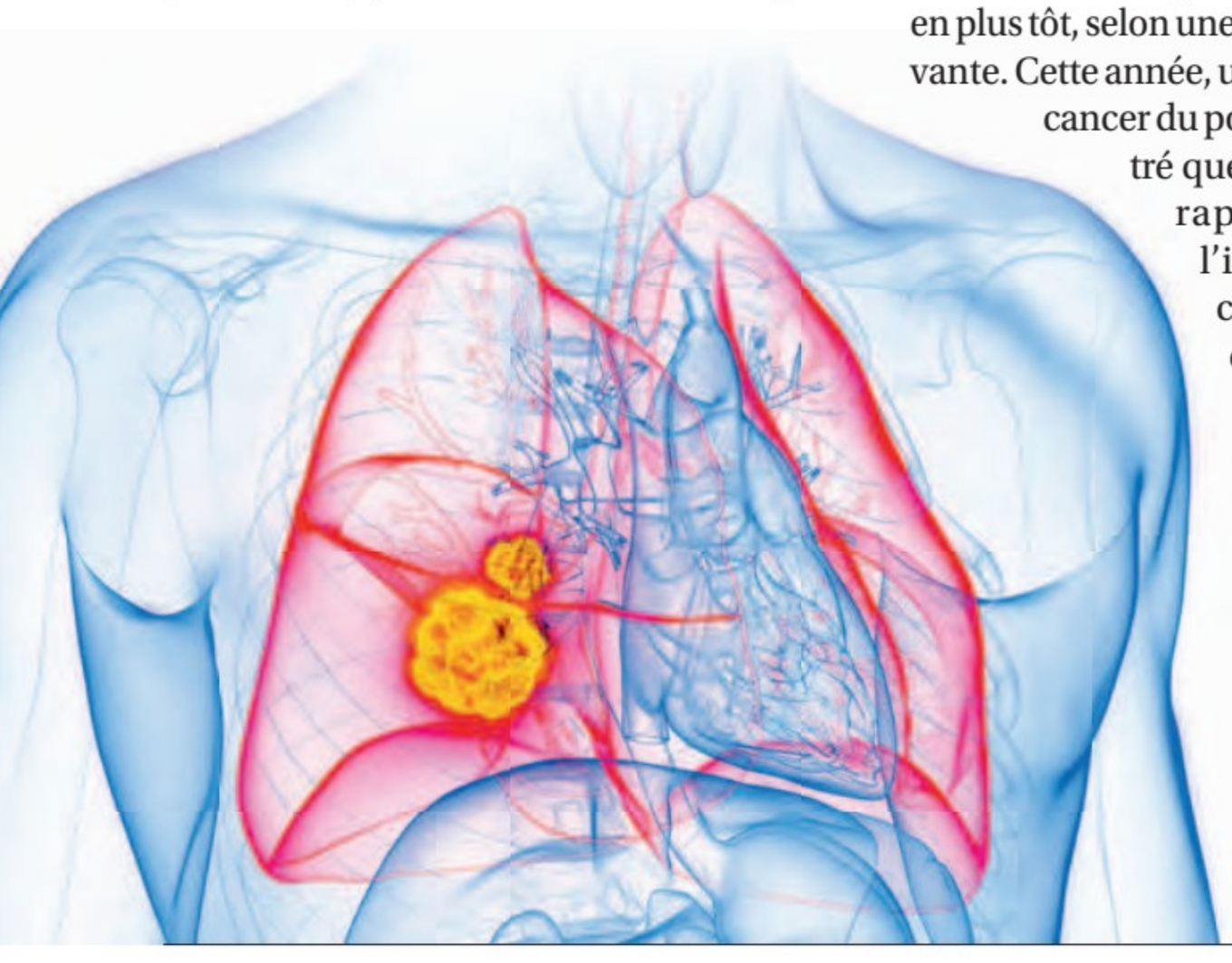
Oscar Larrainzar a reçu un rein et une vessie qui ont ensuite été reliés.

Des avancées majeures au congrès sur le cancer

Des travaux présentés à l'Asco de Chicago démontrent l'efficacité de l'immunothérapie précoce contre le cancer du poumon.

Dix ans après son apparition, l'immunothérapie est plus que jamais d'actualité, comme le prouvent différents travaux présentés lors du dernier congrès de l'Asco (American Society of Clinical Oncology), qui rassemble chaque année à Chicago (États-Unis) plus de 30 000 cancérologues.

Devenu quasiment incontournable, ce traitement moléculaire consiste à agir sur le système immunitaire du patient pour l'aider à lutter contre la maladie. Prescrit aujourd'hui dans de très nombreux cancers (peau, poumon, rein, vessie, tête et cou, mélanome, maladie de Hodgkin…), il est utilisé de plus en plus tôt, selon une approche dite néoadjuvante. Cette année, une étude menée dans le cancer du poumon a même démontré que l'ajout à la chimiothérapie, deux mois avant l'intervention chirurgicale, d'une de ces molécules, ici le nivolumab (Opdivo, laboratoires BMS), permettait de réduire les rechutes et de guérir environ 25 % des patients. **S. R.-M.**



SPL/SUCRÉSALÉ

◀ **30 à 55 % des patients** opérés d'un cancer pulmonaire connaissent une récidive.

3 h 06 min

Le temps d'attente aux urgences en France

À l'échelle du pays, c'est le temps d'attente médian aux urgences (50 % des patients ont attendu plus longtemps, 50 % moins longtemps), selon une étude récente de la Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques (Drees) menée pendant 24 heures. Yonne, Ardennes et Loire sont les départements où l'attente est la plus courte (2 heures), contre plus de 3 h 30 min pour la Bretagne, la Nouvelle-Aquitaine et les Pays-de-la-Loire. S. R.-M.

Magic Magnésium™

Magnésium : l'allié indispensable pour votre équilibre

Saviez-vous que le magnésium joue un rôle clé dans plus de 300 réactions essentielles dans votre corps ? Il aide à réduire la fatigue, soutient vos muscles, votre système nerveux, et renforce vos os. Pourtant, de nombreuses personnes en manquent, en raison du stress, d'une alimentation déséquilibrée ou d'un mode de vie intense.

Pour profiter pleinement des bienfaits du magnésium, encore faut-il qu'il soit bien absorbé ! Associé aux bons éléments, il pénètre mieux dans l'organisme et agit plus efficacement.

Pourquoi choisir une forme bien assimilée ?

Les formes bisglycinate, citrate et malate se distinguent par leur haute absorption. Elles permettent au magnésium d'effectuer son travail de manière optimale. Le laboratoire Danois New Nordic a choisi de développer trois formes de magnésium hautement assimilables, chacune avec des bienfaits ciblés :

1.

MAGIC MAGNÉSIUM **BISGLYCINATE :**

Besoin de repos ?

Un duo gagnant : du magnésium associé à de la glycine, un acide aminé aux vertus apaisantes. Résultat ? Un magnésium hautement biodisponible qui soutient votre système nerveux et favorise une bonne circulation sanguine.

2.

MAGIC MAGNÉSIUM **CITRATE :**

Fatigue persistante ?

Le magnésium citrate intervient directement dans la production d'énergie cellulaire pour réduire l'épuisement physique et mental. Idéal pour retrouver du peps au quotidien !

3.

MAGIC MAGNÉSIUM **MALATE :**

Une pratique sportive intense ?

Cette forme de magnésium soutient vos muscles, prévient les crampes et améliore la récupération après l'effort. Un vrai coup de pouce pour rester en forme.

Magic Magnésium™	Biodisponibilité	Tolérance digestive	Teneur en Magnésium
Bisglycinate	Optimale	Excellente	240 mg
Malate	Très élevée	Excellente	240 mg
Citrate	Très élevée	Excellente	247 mg

Les trois formules associent une combinaison unique de Poivre Long, Pin Maritime, Vitamines B dont B6 et Vitamine D qui maximise l'efficacité du magnésium !

TESTEZ VOTRE BESOIN EN MAGNÉSIUM :

	OUI	NON
Je ressens souvent des crampes ou des tensions musculaires	○	○
Je sais gérer mon stress et mon anxiété	○	○
Je me sens souvent fatigué(e) et en manque d'énergie	○	○
J'ai un sommeil réparateur et je ne manque pas d'énergie	○	○
J'ai tendance à avoir des douleurs articulaires ou musculaires	○	○

Si vous avez une majorité de OUI
Magnésium Bisglycinate : Idéal pour le stress, la relaxation et les tensions nerveuses et musculaires.

Si vous avez une majorité de NON
Magnésium Malate : Pour soutenir l'énergie, la récupération musculaire et la santé osseuse.

Si vous êtes à moitié OUI, moitié NON
Magnésium Citrate : Un excellent équilibre pour lutter contre la fatigue et optimiser votre vitalité.

Magic Magnésium™
Du magnésium au maximum de son potentiel

Disponibles en pharmacie
Magic Magnésium Bisglycinate, Citrate et Malate
60 cp codes ACL 639 192 1, 641 462 4 et 641 462 5.

Des conseils ? Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 42 33 08** ou sur www.vitalco.com

"Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour" www.mangerbouger.fr

JUAN DE LARA

Conditions d'éclairage du temple simulées pour le 30 août 430 avant notre ère, au plus fort de la luminosité.

Athéna à l'ombre du Parthénon

Grâce à des simulations numériques, un chercheur tente de reconstituer l'éclairage originel du célèbre temple consacré à la déesse grecque.

Juché sur l'Acropole à Athènes (Grèce) depuis plus de deux millénaires, le Parthénon ne laisse plus voir aujourd'hui que sa structure en marbre qui le fait resplendir au soleil. Mais il serait faux de s'imaginer que cet emblème de l'architecture classique de la Grèce antique fut conçu comme un temple de lumière lorsqu'il abritait encore la monumentale statue de la déesse Athéna, à laquelle l'édifice était consacré. Construit entre 447 et 438 avant notre ère sous la supervision du sculpteur Phidias, le Parthénon était vraisemblablement un lieu sombre ne laissant que peu admirer la statue de 12 m de haut dite chryséléphantine : ses chairs étaient recouvertes d'ivoire, et sa robe d'or. C'est ce que montrent les travaux menés par Juan de Lara, archéologue à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), qui se consacre depuis plusieurs années à la reconstitution de l'éclairage originel du célèbre temple.

Deux fois par an, une luminosité maximale

Selon ses modélisations numériques, bien peu de lumière pouvait y entrer, même si certains effets optiques pouvaient se produire lors des fêtes consacrées à la déesse. Son étude publiée dans *The Annual of the British School at Athens* a pris en compte tous les éléments pouvant bloquer ou au contraire faire entrer ou réfléchir la lumière, naturelle ou artificielle : *« L'orientation du bâtiment vers le soleil levant, l'emplacement des fenêtres, l'utilisation de barrières et de grilles, les plafonds en marbre translucide, les puits de lumière, et même les bassins "réfléchissants" contenant différents liquides »*, énumère le chercheur. D'après les simulations, le maximum de luminosité se produisait deux fois par an, lorsque l'azimut du Soleil s'alignait sur l'axe du Parthénon, aux alentours du 25 avril et du 30 août vers 5 h 30 du matin. Mais même là, les rayons s'arrêtaient au niveau de sa taille. De fait, selon les historiens, le temple n'était qu'un écrin servant à conserver la statue d'Athéna, qui pouvait éventuellement servir de réserve d'or (elle était recouverte de plus d'une tonne de métal !) en cas de crise. ■ **S. de L.**

La plus violente des tempêtes solaires

ASTRONOMIE Des souches d'arbres fossilisées, découvertes près de Gap (Hautes-Alpes), ont révélé un pic anormal de carbone 14, preuve d'une tempête solaire survenue il y a 14 300 ans. Grâce à un nouveau modèle de simulation, il a été établi qu'il s'agissait de la plus violente jamais enregistrée, dépassant celle de l'an 775 qui était la référence. Un tel événement aujourd'hui causerait un chaos technologique mondial. **J. I.**

SOURCE : KSENIIA GOLUBENKO, UNIVERSITÉ AIX-MARSEILLE, FRANCE.

M. ROTHMAN, O'CONNOR

Représentation artistique du dinosaure ailé du musée de Chicago.

Trois types de plumes chez l'archéoptéryx

PALÉONTOLOGIE Le fossile d'archéoptéryx acquis par le Field Museum de Chicago (États-Unis) révèle des plumes tertiaires, jamais vues jusque-là chez les dinosaures ailés. Ces plumes — essentielles à la portance — et la présence de régimes asymétriques confirment l'idée que l'archéoptéryx pouvait bien voler en battant des ailes. Ses pieds, adaptés à la fois au sol et aux branches, et son crâne, annonçant l'évolution du bec mobile, renforcent sa place de « premier oiseau ». **J. I.**

TSFJAZZ.COM

TSFJAZZ ET LIVE NATION

en accord avec Montuno

PRÉSENTENT LA 2ème ÉDITION DU

TSF JAZZ CHANTILLY FESTIVAL

SAMEDI 5 ET DIMANCHE 6 JUILLET 2025

DANS LE PARC DU CHÂTEAU DE CHANTILLY

15 CONCERTS, 100 ARTISTES

LE FESTIVAL 100 % JAZZ

SAMARA JOY
MARCUS MILLER
MONTY ALEXANDER
AVISHAI COHEN
KAMASI WASHINGTON
SOPHYE SOLIVEAU
GABI HARTMANN
ISAIAH COLLIER
SULLIVAN FORTNER
TYREEK MCDOLE
LUDOVIC LOUIS
THE HOOKUP - LAURENT / MOUTIN(S) / HUCHARD
COULONDRE / DOLMEN / PRIVAT
FANOU TORRACINTA
JAZZ CÉLÉBRATION

BILLETTERIE OUVERTE DANS TOUS LES POINTS DE VENTE HABITUELS

PLUS D'INFOS SUR WWW.TSFJAZZCHANTILLYFESTIVAL.COM

Ville de Chantilly
Ville d'Art et d'Histoire

Château de Chantilly
INSTITUT DE FRANCE

Région Hauts-de-France

Aire Cantilienne

Le Parisien

media transports
Pour une publicité utile

Vive le jazz

sacem

Le dernier repas du sauropode

En Australie, des paléontologues ont découvert le contenu stomacal fossilisé de ce dinosaure.

ALAMY/PHOTO12

Des restes d'aiguilles et de fruits de conifères ainsi que des feuilles de plantes à fleurs non mâchés se trouvaient dans l'estomac fossilisé de ce grand dinosaure au long cou (ici, en vue d'artiste).

Sous les côtes d'un *Diamantinasaurus matildae*, retrouvé en Australie, les paléontologues ont découvert du contenu stomacal fossilisé. Une première pour un sauropode, ce gros dinosaure au cou allongé. Son estomac renfermait des restes de conifères, de fougères, des feuilles d'angiospermes et des biomarqueurs typiques des fruits. Le tout se composant de petits morceaux d'une dizaine de centimètres qui suggère une alimentation opportuniste, sans mastication. Au-delà de la diversité végétale, c'est la présence de plantes à fleurs qui a surpris. Encore rares au début du crétacé, elles deviennent plus communes en Australie autour de -100 à -95 millions d'années, ce qui est justement l'âge de ce dinosaure. « *Cela indique que les sauropodes les avaient déjà intégrées à leur régime alimentaire, moins de 40 millions d'années après leur apparition* », souligne Stephen Poropat, principal auteur de l'étude. Une preuve de flexibilité alimentaire qui pourrait expliquer, en partie, la longévité de ce groupe. **J. I.**

PERU MINISTRY OF CULTURE

Une femme d'élite de la civilisation de Caral, au Pérou

ARCHÉOLOGIE Des fouilles sur le site archéologique d'Aspero, au Pérou, ont mis au jour les restes d'une femme datant d'environ -5000 ans, liés à la civilisation de Caral, la plus ancienne d'Amérique. Enterré avec divers objets, dont un bec de toucan et un bol en pierre, le corps était enveloppé de plusieurs couches de textile et d'un manteau en plumes d'ara (un perroquet amazonien), signe que cette femme de 20 à 35 ans avait probablement un statut élevé. **H. J.**

Une besace amérindienne retrouvée

ARCHÉOLOGIE Mis au jour dans une grotte du Missouri (États-Unis) dans les années 1960, ce petit sac en fibres végétales tissées attribué à la tribu Osage et daté entre -2000 et -500 ans a été remis par une famille au musée universitaire de l'Arkansas. Il s'avère être l'un des artefacts amérindiens précontact — avant le premier contact avec les Européens — en matière organique le mieux conservé jamais découvert. La petite bourse servait à transporter des graines, dont certaines étaient encore à l'intérieur. **M. B.**

IHOPALONGRHAPSODY/REDDIT

La petite bourse tressée contenait des graines.

115 MILLIONS D'ANNÉES

L'âge de la trace d'un tsunami dans de l'ambre

PALÉOGÉOLOGIE

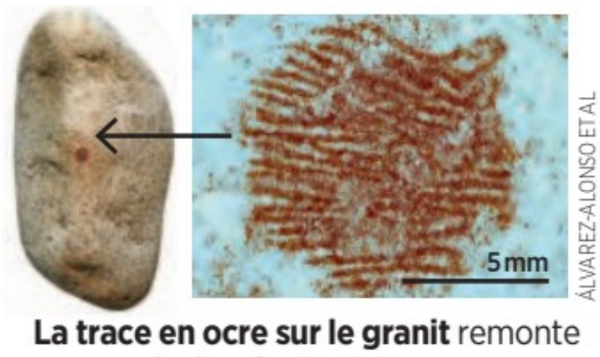
L'analyse d'un étrange morceau d'ambre sous-marin trouvé près de l'île d'Hokkaido au Japon et datant du crétacé a révélé la trace d'un possible tsunami de très grande ampleur survenu il y a entre 114 et 116 millions d'années. H. J.

SOURCE : AYA KUBOTA, UNIVERSITÉ CHUO, JAPON.

Une mystérieuse empreinte digitale de Neandertal

ANTHROPOLOGIE L'analyse physico-chimique d'un galet de granit trouvé dans un abri-sous-roche au nord de Madrid (Espagne) a révélé la plus ancienne empreinte digitale humaine. Une trace d'ocre faite par un homme de Neandertal il y a plus de 40 000 ans. Il pourrait s'agir d'une volonté de faire apparaître un nez au milieu de trois petites dépressions naturelles pouvant figurer deux yeux et une bouche. Et ce bien avant l'art figuratif des *H. sapiens*. **J. I.**

SOURCE : D. ÁLVAREZ-ALONSO, UNIV. COMPLUTENSE DE MADRID, ESPAGNE.



ÁLVAREZ-ALONSO ET AL.

La trace en ocre sur le granit remonte à plus de 40 000 ans.

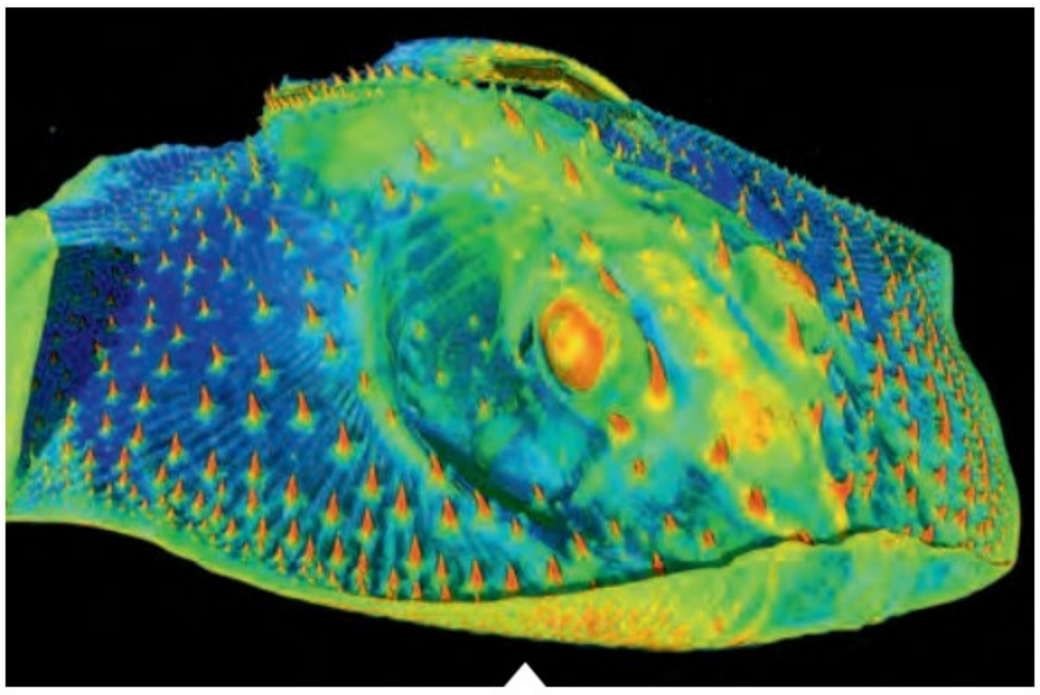
IA et réalité virtuelle ressuscitent les danses baroques

PATRIMOINE Bourrée, menuet, courante, gigue… Une initiative de l'université de Lille et du CNRS vise à rendre la pratique de ces danses du XVIIIe siècle plus accessible.
Le projet Get-In-Past s'est appuyé sur l'intelligence artificielle et la réalité virtuelle pour restituer les pas de danse décrits dans un manuscrit qu'Auguste Ferrère, maître de ballet, avait rédigé à l'occasion d'une représentation tenue à Valenciennes en 1782. **H. J.**

La lèpre touchait les Amériques avant l'arrivée des colons

INFECTIOLOGIE **Longtemps considérée comme une maladie apportée aux Amériques par les Européens, la lèpre aurait en réalité une histoire bien plus ancienne sur le continent américain. À partir d'analyses d'ADN ancien trouvé au Canada et en Argentine, une étude franco-américaine révèle qu'une deuxième espèce récemment découverte de bactérie responsable de la lèpre, *Mycobacterium lepromatosis*, y infectait les humains depuis au moins 1000 ans. H. J.**

SOURCE : MARIA LOPOPOLO, INSTITUT PASTEUR, FRANCE.



Cette raie a des denticules sur sa peau (en orange) visibles au scanner.

Les dents des vertébrés sont apparues hors de la bouche

ÉVOLUTION Une équipe a décelé la présence de denticules sur l'exosquelette de certains poissons cuirassés vieux de 465 millions d'années. Ces structures, ressemblant à de petites bosses, étaient formées de dentine et reliées à des nerfs, servant sans doute de capteurs de température, de mouvement ou de pression. La dentine s'est conservée ainsi au cours de l'évolution. De sorte que la sensibilité de nos dents — en particulier chez le dentiste — serait un héritage de ces poissons ancestraux. **J. I.**

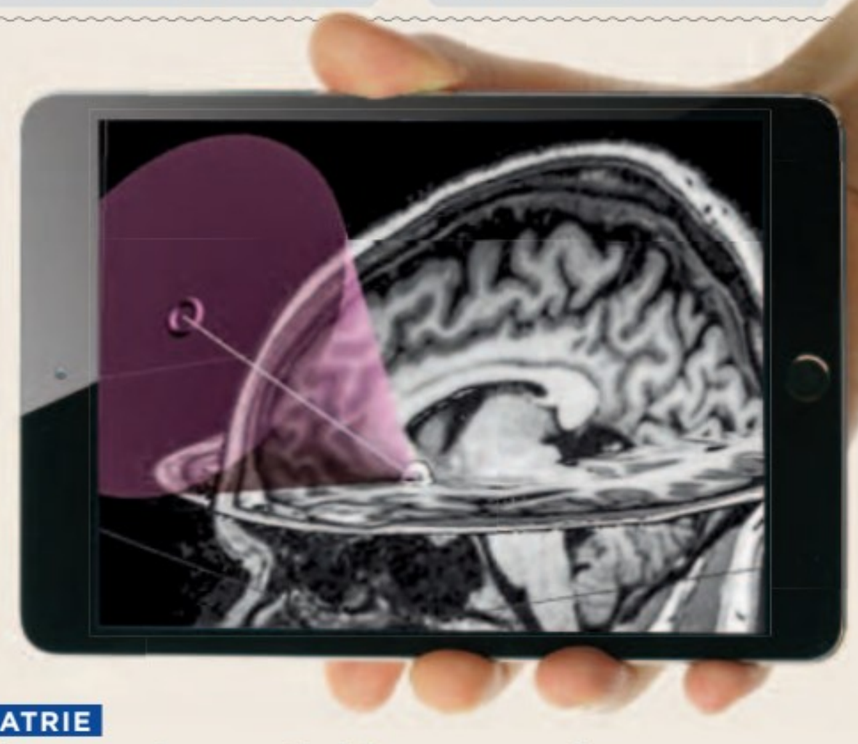
SOURCE : YARA HARIDY, UNIVERSITÉ DE CHICAGO, ÉTATS-UNIS.

YARA HARIDY

D. ATTALI ET AL. ; RMN-GP ; SHUTTERSTOCK ; ELÉA ROPIOT – AMU

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr



PSYCHIATRIE

La dépression ciblée aux ultrasons

Une étude menée par des psychiatres et des physiciens français révèle des résultats prometteurs pour le traitement de la dépression résistante aux traitements par une nouvelle technique de neuromodulation utilisant des ultrasons ultrafocalisés. À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/941dep

RENCONTRES

Posez vos questions aux chercheurs sur Twitch

Jeux vidéo et santé mentale, avenir de la fusion nucléaire, exploration des fonds marins… La chaîne Twitch de *Sciences et Avenir* reçoit chaque semaine des scientifiques invités à faire le tour de leurs sujets de prédilection et répondre à vos questions. À voir en replay. sciav.fr/941twitch

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Un mythique manuscrit médiéval

Reportage vidéo au château de Chantilly (Oise), qui expose du 7 juin au 25 octobre *Les Très Riches Heures du duc de Berry*, superbe manuscrit médiéval restauré récemment.
sciav.fr/941berry

5 minutes

Révolution pour les boîtes d'œufs

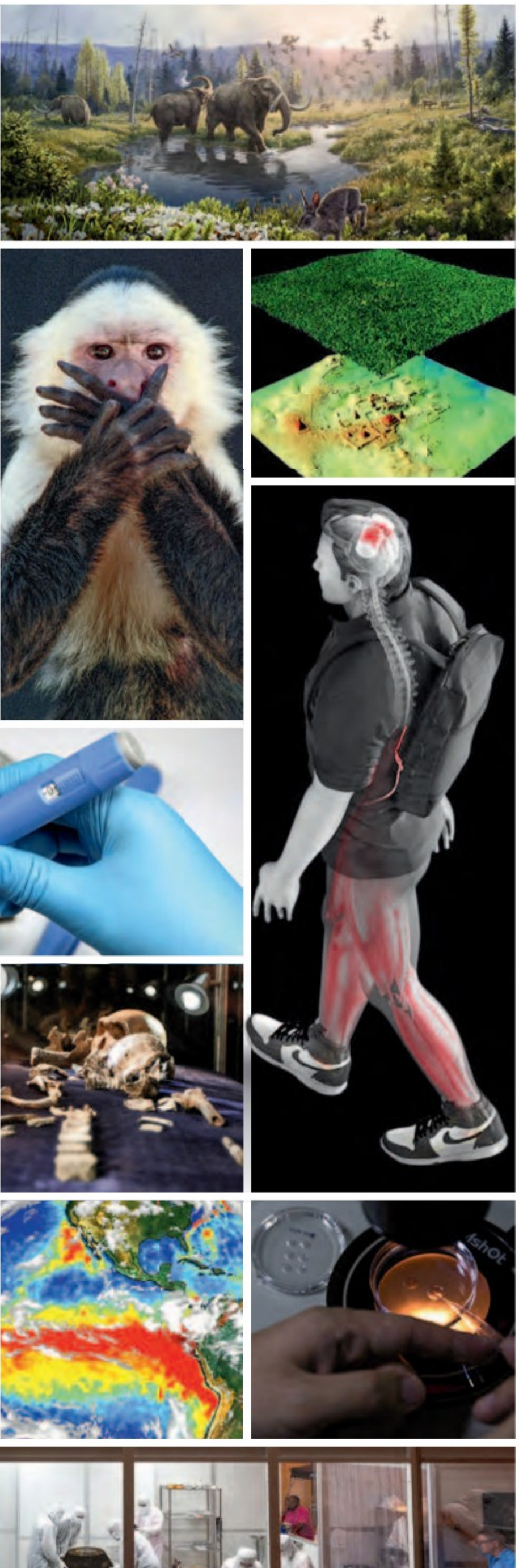
Selon des expériences très sérieuses, ranger les œufs à la verticale plutôt qu'à l'horizontale augmenterait le risque qu'ils se cassent en cas de chute. Explications.
sciav.fr/941oeuf

10 minutes

Ce que la science apprend des athlètes

Sciences et Avenir vous emmène à Marseille où une plateforme scientifique de recherche de pointe axée sur le sport et la santé vient d'être inaugurée.
sciav.fr/941sport

Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook



2000-2025

Les **25** grandes découvertes

... et les 25 prochaines

Le boson de Higgs, les premiers instants de l'Univers, l'édition génomique, les techniques de l'IA, du lidar ou des implants cérébraux... Autant d'avancées qui ont bouleversé la science depuis l'an 2000. Retour sur cette aventure humaine stimulante.

Dossier réalisé par
la rédaction

2012 2000 2025

Le boson de Higgs enfin démasqué

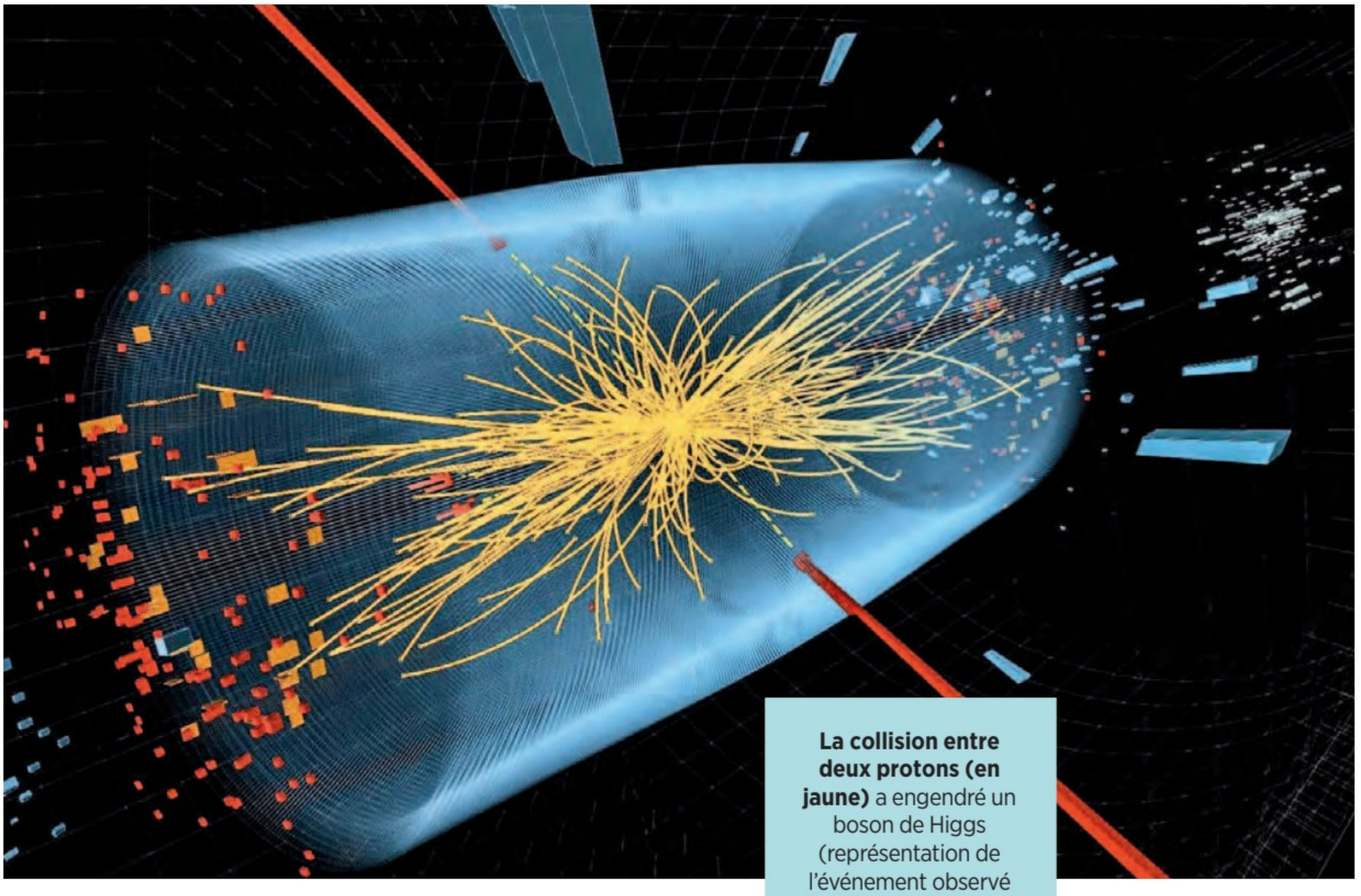
Après un travail acharné, les chercheurs du Cern ont prouvé en 2012 l'existence d'une particule appelée « boson de Higgs », prédite 48 ans plus tôt. Elle était la pièce manquante du modèle standard de la physique.

« *Ça y est, on le tient !* », s'écriait le 4 juillet 2012 Rolf-Dieter Heuer, directeur général de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (Cern), à quelques kilomètres de Genève (Suisse), lors d'une conférence de presse suivie par tous les grands médias internationaux. « *Nous avons franchi une nouvelle étape dans notre compréhension de la nature* », jubilait-il devant un auditoire survolté, avant de laisser la parole à une kyrielle d'experts du plus grand laboratoire de physique des particules au monde.

Cette annonce marquait l'aboutissement d'une longue quête. Après un travail acharné, les chercheurs du Cern prouvaient enfin l'existence d'une particule appelée « boson de Higgs », prédite 48 ans plus tôt. Elle était la pièce manquante du modèle standard de la physique des particules, théorie de l'infiniment petit qui décrit l'ensemble des particules élémentaires — tels les électrons ou les quarks — et leurs interactions fondamentales. Mais le boson de Higgs occupait une place à part dans ce bel échafaudage : c'est grâce à lui, rien de moins, que les particules acquièrent leur masse, et que les physiciens expliquent l'origine même de la matière ! « *La mise en évidence du boson de Higgs est assurément l'une des plus grandes découvertes de ce siècle. Et a été pour moi un moment d'euphorie extrême,* se remémore Yves Sirois, directeur du Laboratoire Leprince-Ringuet de l'École polytechnique, à Palaiseau, qui participa avec des centaines d'autres physiciens à cet exploit. *Nous avions tous pleinement conscience de mettre la main sur un mécanisme expliquant la physique qui s'est mis en place une fraction de seconde après le Big Bang.* »

Un champ qui se serait stabilisé peu après le Big Bang

Le boson de Higgs a été proposé en 1964, de manière indépendante, par le Britannique Peter Higgs et les Belges Robert Brout et François Englert. Ces théoriciens visent à résoudre alors une difficulté essentielle dans les équations du modèle standard. Régies par des lois de conservation et de symétrie, elles exigent que les particules véhiculant notamment l'interaction électromagnétique (responsable de l'électricité, du magnétisme ou de la lumière) et l'interaction faible (qui régule la fusion nucléaire au cœur des étoiles) aient une masse nulle. C'est le cas pour les photons, qui transmettent la force électromagnétique sur des distances infinies. Mais les porteurs de l'interaction faible, qui agit à des échelles extrêmement réduites au niveau ato-



CREDIT HOPD/AP/SIPA

La collision entre deux protons (en jaune) a engendré un boson de Higgs (représentation de l'événement observé en 2012 dans le LHC du Cern).

mique, ont de toute évidence une masse très élevée (elle sera mesurée très précisément au Cern dans les années 1980). Pour l'expliquer, les trois chercheurs ne modifient pas les propriétés des interactions fondamentales. Mais ils présument que celles-ci, ainsi que toutes les particules connues, sont plongées dans une sorte de champ de force aux caractéristiques inédites emplissant tout l'espace. Plus les particules interagiraient avec cette « mélasse » invisible, plus elles seraient ralenties et acquéraient une masse. Dénommé par la suite « champ de Higgs » et engendré par le boson éponyme, *« ce champ présent partout et à tout moment dans l'Univers structure ce que nous appelons le vide quantique, qui n'est donc pas le néant »*, explique Yves Sirois. Il se serait stabilisé peu après le Big Bang, lorsque l'Univers a débuté son expansion et que la densité d'énergie est devenue inférieure à celle du champ de Higgs. *« Celui-ci aurait commencé alors à agir,* expose le physicien, *en brisant les symétries originelles et en conférant leur masse aux particules. »*

Une théorie fascinante… qui reste cependant à démontrer en observant l'hypothétique boson. Première difficulté : *« rien dans la théorie ne prédisait la masse du boson »*, rappelle Fabrice Couderc, de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), à Saclay. Il faudra donc le rechercher dans de larges éventails de masses grâce aux accélérateurs de particules, qui, en entrechoquant divers objets subatomiques à des vitesses proches de celle de la lumière, dévoilent leurs constituants les plus intimes — en l'occurrence les preuves de l'existence du boson. Or, même avec les plus puissants collisionneurs, *« il serait produit de façon extrêmement rare »*, signale Fabrice Couderc. Environ une chance sur un milliard. Mais ce n'est pas tout. Car le boson de Higgs aurait une durée de vie extrêmement fugace — de l'ordre du dixième de millième de milliardième de milliardième de seconde (10^{-22} s). Et ▶

YVES SIROIS

« Sa mise en évidence est assurément l'une des plus grandes découvertes de ce siècle »

Yves Sirois, directeur du Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR) de l'École polytechnique, à Palaiseau

pour ne rien simplifier, il aurait le mauvais goût de se désintégrer en engendrant d'anodines particules totalement indiscernables dans un gigantesque bruit de fond. *« Sauf dans quelques cas sur des milliers de bosons de Higgs produits, où des signatures exceptionnelles seraient alors très nettes »*, précise Fabrice Couderc.

Des instruments titanesques pour le traquer

La traque ne commencera ainsi véritablement que dans les années 1990 au Cern, au moyen du Grand collisionneur électron-positron. Et se poursuivra jusqu'à la fin des années 2000 au Fermilab près de Chicago (États-Unis), grâce à l'accélérateur Tevatron et ses collisions proton-antiproton de hautes énergies. *« Même si des résultats encourageants avaient été enregistrés lors des dernières campagnes de mesure, le boson de Higgs était toujours insaisissable »*, indique Fabrice Couderc.

Les physiciens placent alors tous leurs espoirs dans la nouvelle machine du Cern : le Grand collisionneur de hadrons (LHC), le plus puissant accélérateur de particules conçu à ce jour, pouvant atteindre une énergie faramineuse de 14 000 milliards d'électronvolts (sept fois plus que le Tevatron), dont la construction aura duré dix ans pour un coût dépassant les 5 milliards d'euros.

Pour recueillir les myriades de produits issus des collisions, le LHC utilisera en outre des instruments titanesques : les détecteurs Atlas et CMS en particulier, qui mesurent respectivement 40 et 20,5 mètres de long et affichent 7000 et 12 500 tonnes sur la balance. Pourtant, *« lorsque le LHC est entré en fonctionnement au printemps 2010, certains physiciens juraient encore dans les couloirs du Cern qu'on ne détecterait jamais le boson de Higgs, que ce n'était pas la bonne solution pour expliquer la masse des particules »*, se souvient Yves Sirois. Mais le LHC tiendra rapidement ses promesses. *« Dès la fin 2011, Atlas et CMS commenceront à observer les fameuses signatures,* raconte l'expert. *Et nous réunirons toutes les preuves nécessaires quelques mois plus tard, à la mi-juin. »* Hourra ! Peter Higgs et François Englert partagent le Nobel de physique dès l'année suivante (Robert Brout est décédé en mai 2011). ■

Franck Daninos

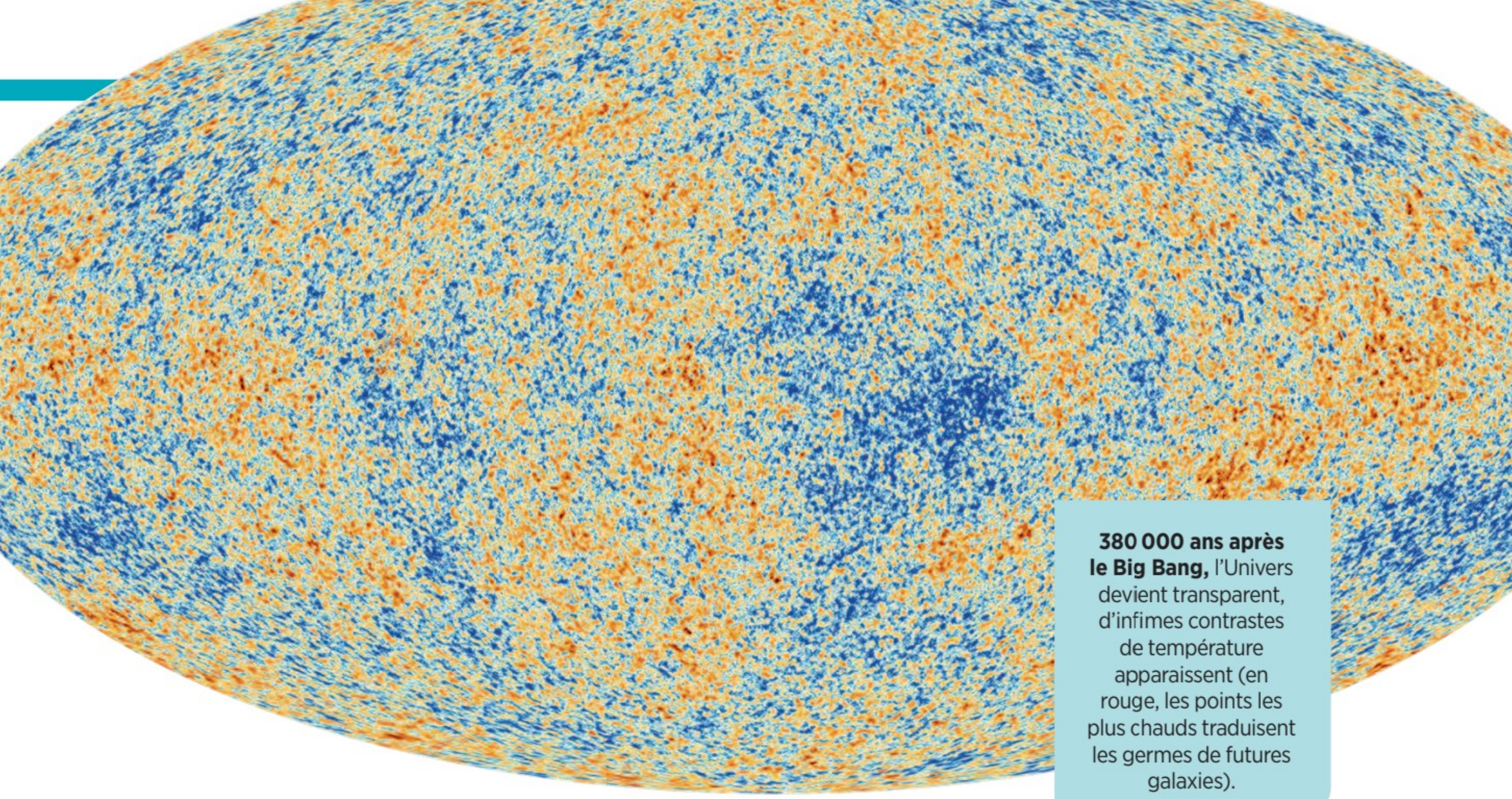
L'observation inédite d'un objet interstellaire

OBSERVATION Grâce à un formidable coup de chance, le télescope Pan-Starrs à Hawaii (États-Unis) identifie en 2017 le premier objet interstellaire de l'histoire de l'astronomie. Baptisé Oumuamua, il a la forme d'une galette d'environ 150 mètres de diamètre. Sa très grande vitesse (plus de 300 000 km/h) et sa trajectoire hyperbolique prouvent qu'il n'est pas lié gravitationnellement au Système solaire, qu'il ne fait que traverser. Repéré alors qu'il s'éloignait déjà du Soleil, Oumuamua n'a pu être observé que pendant quelques semaines. Mais les astronomes espèrent débusquer prochainement d'autres visiteurs de ce type, et collecter ainsi des informations inestimables sur leur système stellaire d'origine. **F. D.**

SPL/SUCRÉ SALÉ - DPA/ABC/ANDIA.FR

Internet à haut débit sur téléphone

CONNEXION Avec le lancement de la 3G en 2001, puis de la 4G dans les années 2010, Internet tel qu'on le connaît sur ordinateur arrive vraiment sur les téléphones mobiles, avec son lot d'applications, de jeux en ligne et, surtout, de vidéos, qu'il s'agisse de visiophonie ou de films et séries en *streaming*. Des usages également facilités par la généralisation des smartphones, comme le premier iPhone lancé en 2007, dotés d'écrans tactiles ne nécessitant ni stylet ni clavier, leur permettant ainsi de gagner en dimension. **A. D.**



380 000 ans après le Big Bang, l'Univers devient transparent, d'infimes contrastes de température apparaissent (en rouge, les points les plus chauds traduisent les germes de futures galaxies).

ESA AND THE PLANCK COLLABORATION

La première lumière de l'Univers

Révélée en haute définition par le satellite Planck en 2013, l'image du fond diffus cosmologique montre la structure en devenir de notre univers et révèle sa composition.

Ce fouillis de taches rouges, bleues et jaunes constitue l'une des images les plus célèbres mais aussi les plus énigmatiques du cosmos. Son nom savant, le « fond diffus cosmologique », n'aide guère à la rendre plus lisible. Pourtant c'est assez simple : il s'agit ni plus ni moins que de la plus ancienne photo de l'Univers, capturée par le satellite européen Planck entre 2009 et 2013. Un record d'ancienneté qui ne sera jamais battu car auparavant, la lumière ne circulait pas dans l'Univers.

Le fond diffus montre en effet un instant bien précis de l'histoire du cosmos. Celui où, 380 000 ans après le Big Bang, il est devenu transparent. À l'époque, le gaz primordial s'est suffisamment refroidi pour que les électrons se lient aux protons, formant les premiers atomes. Les photons, particules de lumière jusque-là piégées par d'incessantes collisions avec les électrons, se libèrent. Ils se propagent dans toutes les directions, donnant naissance à une aube jaune pâle baignant tout l'Univers. Sa température est alors de 2700 °C environ. Ce rayonnement s'est refroidi avec le temps et l'expansion de l'Univers. Aujourd'hui, 13,8 milliards d'années plus tard, il ne « brille » que dans le domaine des micro-ondes, à une température de -270 °C.

Cette température est une moyenne. Certains points sont plus chauds, d'autres plus froids. Cela explique la palette de couleurs de l'image, qui va du rouge au bleu. Les écarts sont minuscules — de l'ordre d'un dix-millième de degré — mais lourds de conséquences car ils ont dessiné la trame de l'Univers, les zones les plus chaudes traduisant les concentrations de matière les plus importantes. Les taches rouges préfigurent ainsi les amas de galaxies à venir.

La quantité de matière et d'énergie a pu être établie

En analysant la taille et la position des taches sur la carte et en les confrontant à des modèles numériques, les astrophysiciens ont pu en déduire la quantité de matière et d'énergie que contient l'Univers. Ils ont ainsi établi qu'il est composé à 5 % de matière ordinaire, 27 % de matière noire et 68 % d'énergie sombre. Ce fond diffus indique aussi que l'Univers est plat : si sa courbure était différente, les motifs observés seraient déformés. Aujourd'hui, les chercheurs traquent dans cette lumière les traces d'ondes gravitationnelles primordiales, vestiges de l'inflation cosmique survenue juste après le Big Bang. Ce cliché vieux de 13,8 milliards d'années n'a pas livré tous ses secrets. ■ **Fabrice Nicot**

L'essor des éponges moléculaires

Une nouvelle famille de solides poreux hybrides, connue sous le nom de MOF, permet de piéger une grande variété de substances.

Ce n'est encore qu'un prototype de laboratoire, mis au point il y a quelques mois à l'université de Californie à Berkeley (États-Unis). Mais cette poudre blanchâtre suscite déjà de grands espoirs pour aider les industries du ciment ou de l'acier à réduire leurs émissions de dioxyde de carbone (CO_2). Constituée d'éléments minéraux — des hydrures de zinc — et de composés organiques, elle capture plus de 90 % du CO_2 avec lequel elle est mise en contact, de manière extrêmement spécifique et réversible, à des températures dépassant 200 °C. Ses capacités d'absorption sont phénoménales : pour une cuillère à soupe de cette poudre cristalline, la surface intérieure de contact correspond en effet à six terrains de football ! *« Ce matériau appartient à une nouvelle famille de solides poreux hybrides connue sous le nom de MOF (pour Metal-organic framework). Elle suscite depuis une vingtaine d'années une très intense activité de recherche, avec actuellement plus de 40 publications scientifiques chaque jour »*, explique Christian Serre, chercheur CNRS, membre de l'Académie des sciences, qui dirige l'Institut des matériaux poreux de Paris.

Des matériaux « gruyère » à l'exceptionnelle porosité

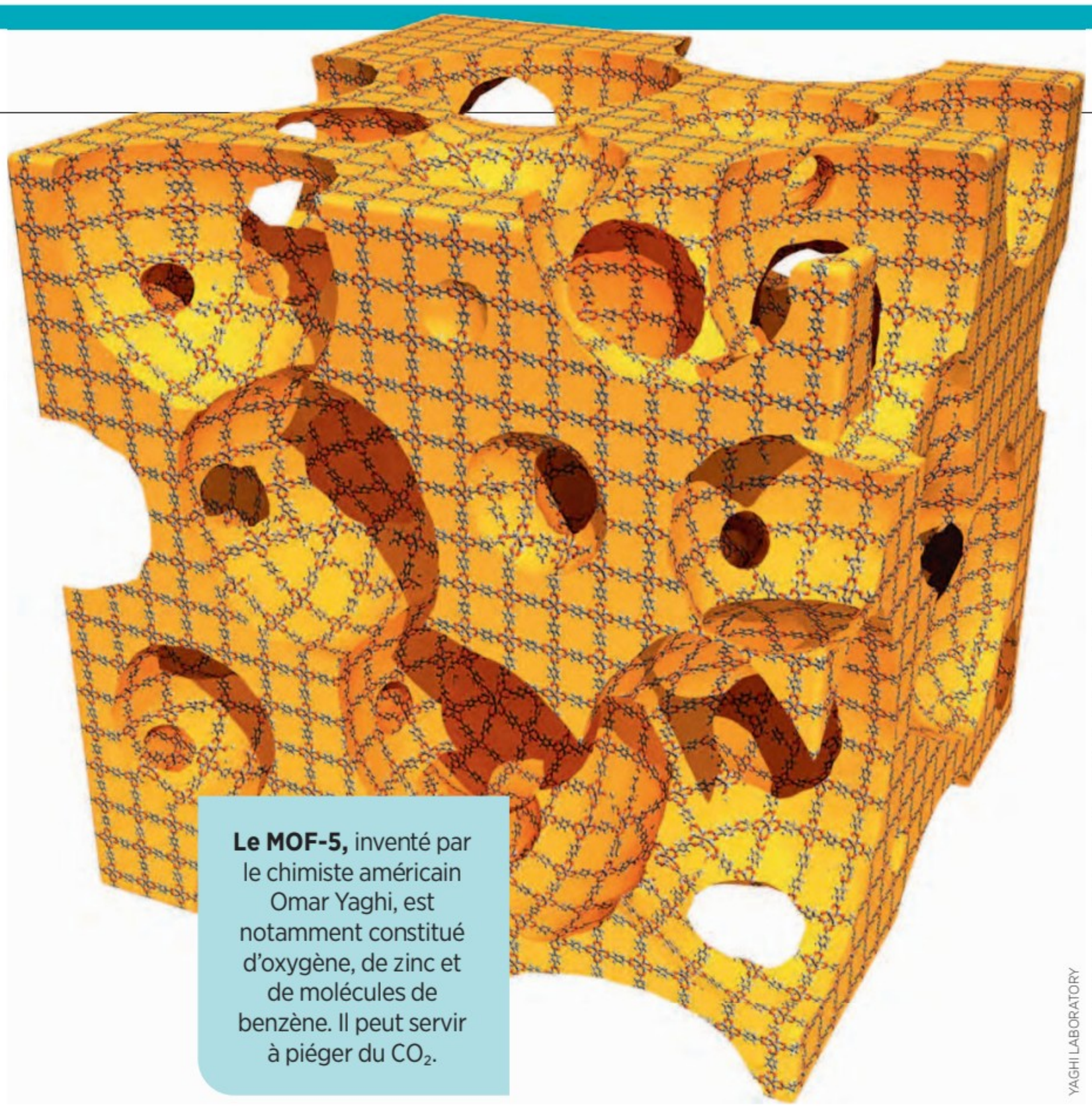
Trois équipes de chercheurs ont contribué tout particulièrement à l'essor des MOF au début des années 2000 : celles d'Omar Yaghi, alors à l'université du Michigan (États-Unis), de Susumu Kitagawa, de l'université de Kyoto (Japon), et de Gérard Férey, de l'université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines. Trois potentiels lauréats du prix Nobel de chimie (hélas, plus pour le Français décédé en 2017), qui ont montré chacun à leur manière comment synthétiser

RICARDO NAGAOKA/THE NYT/REA

ChatGPT, l'ère des chatbots

L'intelligence artificielle prend son essor au moyen d'outils puissants proposés au grand public, avec des interfaces simples et intuitives.

L'agent conversationnel ChatGPT utilise les grands modèles de langage, une nouvelle génération d'algorithmes qui ont été entraînés sur d'énormes quantités de données textuelles.



Le MOF-5, inventé par le chimiste américain Omar Yaghi, est notamment constitué d'oxygène, de zinc et de molécules de benzène. Il peut servir à piéger du CO_2.

YAGHI LABORATORY

ces matériaux « gruyère », et mis en évidence leur exceptionnelle porosité. Cette dernière résulte de l'assemblage d'ions métalliques (aluminium, fer, zinc…) portant des charges électriques positives avec des composés organiques chargés négativement, constitués le plus souvent de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. *« À la manière d'un Lego, en jouant sur le nombre et le type d'ions métalliques ainsi que sur la forme et la taille des entités organiques, on peut construire des myriades d'architectures pour moduler les propriétés physico-chimiques »*, précise Christian Serre.

Plus de 130 000 structures ont ainsi été synthétisées à ce jour, permettant de piéger et parfois même de décomposer une variété de substances telles que le dioxyde de carbone, le formaldéhyde ou les oxydes d'azote. *« Les applications industrielles concernent la dépollution de l'air, le stockage de gaz, la déshumidification ou la production d'eau douce »*, se réjouit Christian Serre. ■ **Franck Daninos**

Au XX^e^ siècle, Eliza était l'un des agents conversationnels, ou chatbot, les plus connus. Conçu par Joseph Weizenbaum au Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, États-Unis) au milieu des années 1960, il imitait un psychothérapeute rogérien, répétant sous forme de questions les propos du patient. Si le programme a fait sensation à l'époque, les chatbots n'ont, il faut le reconnaître, jamais vraiment été époustouflants. Jusqu'en novembre 2022 et ChatGPT. Mise en ligne par son développeur OpenAI, cette interface en langage naturel sidère d'emblée par la fluidité de son expression, son apparente capacité à répondre à tout avec assurance, et l'illusion qu'elle comprend ce qu'on lui dit. D'autres suivent rapidement, tout aussi performantes : Bard/Gemini de Google, Claude d'Anthropic, Le Chat de Mistral AI, Moshi de Kyutai, Meta AI de Meta…

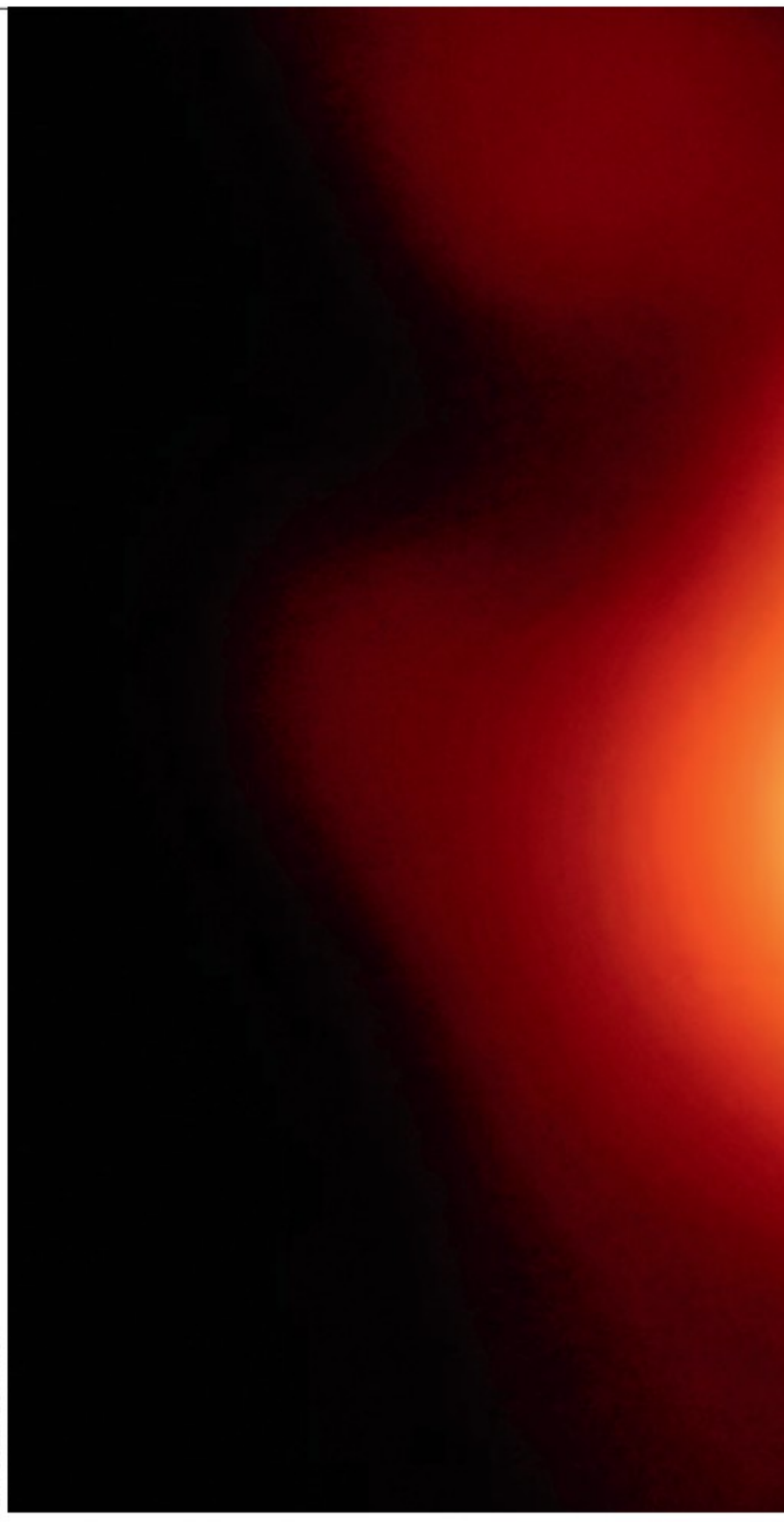
Derrière ces outils d'intelligence artificielle (IA) se trouve une nouvelle génération d'algorithmes : les LLM, ou grands modèles de langage. En l'occurrence, les modèles GPT pour ChatGPT. Ils reposent sur des méthodes d'apprentissage profond (*deep learning*) connues depuis la fin des années 1980, mais qui n'ont vraiment commencé à bien marcher qu'à partir de 2012 et qui n'ont cessé de s'améliorer depuis. C'est d'ailleurs pour leurs travaux en la matière que l'Américain John Hopfield et l'Anglo-Canadien Geoffrey Hinton ont reçu le prix Nobel de physique en octobre 2024. Le second avait déjà obtenu le prix Turing en 2019, avec le directeur du laboratoire d'IA de Meta Yann Le Cun et l'universitaire canadien Yoshua Bengio.

Les LLM ne suivent plus des règles prédécrites comme les anciens chatbots. Ils ont été entraînés sur une quantité faramineuse de données textuelles (à commencer par l'essentiel des contenus publiés en ligne), à l'aide de capacités de calcul énormes (*lire aussi p. 80*). De l'analyse statistique de ces corpus, ils tirent d'eux-mêmes des règles qui leur permettent de générer une réponse calculée comme étant la plus probable, tant sur la syntaxe que sur la manière de s'exprimer ou le style, en fonction de la question posée. En clair, les LLM ne sont pas codés pour bien conjuguer ou compter, ni pour vérifier des faits. Ils n'ont aucune connaissance à proprement parler.

Plus que dans la technologie, déjà connue, c'est dans l'usage que réside la révolution. C'est la première fois que des outils aussi puissants sont proposés au grand public, *via* des interfaces simples et intuitives, pour créer du texte mais aussi des images, du code informatique ou des vidéos. Le tout en manipulant un matériau hautement synonyme d'intelligence : le langage. ■ **Arnaud Devillard**

Une image inédite d'un trou noir

En 2019, une équipe internationale dévoile la première image de l'ombre d'un trou noir.

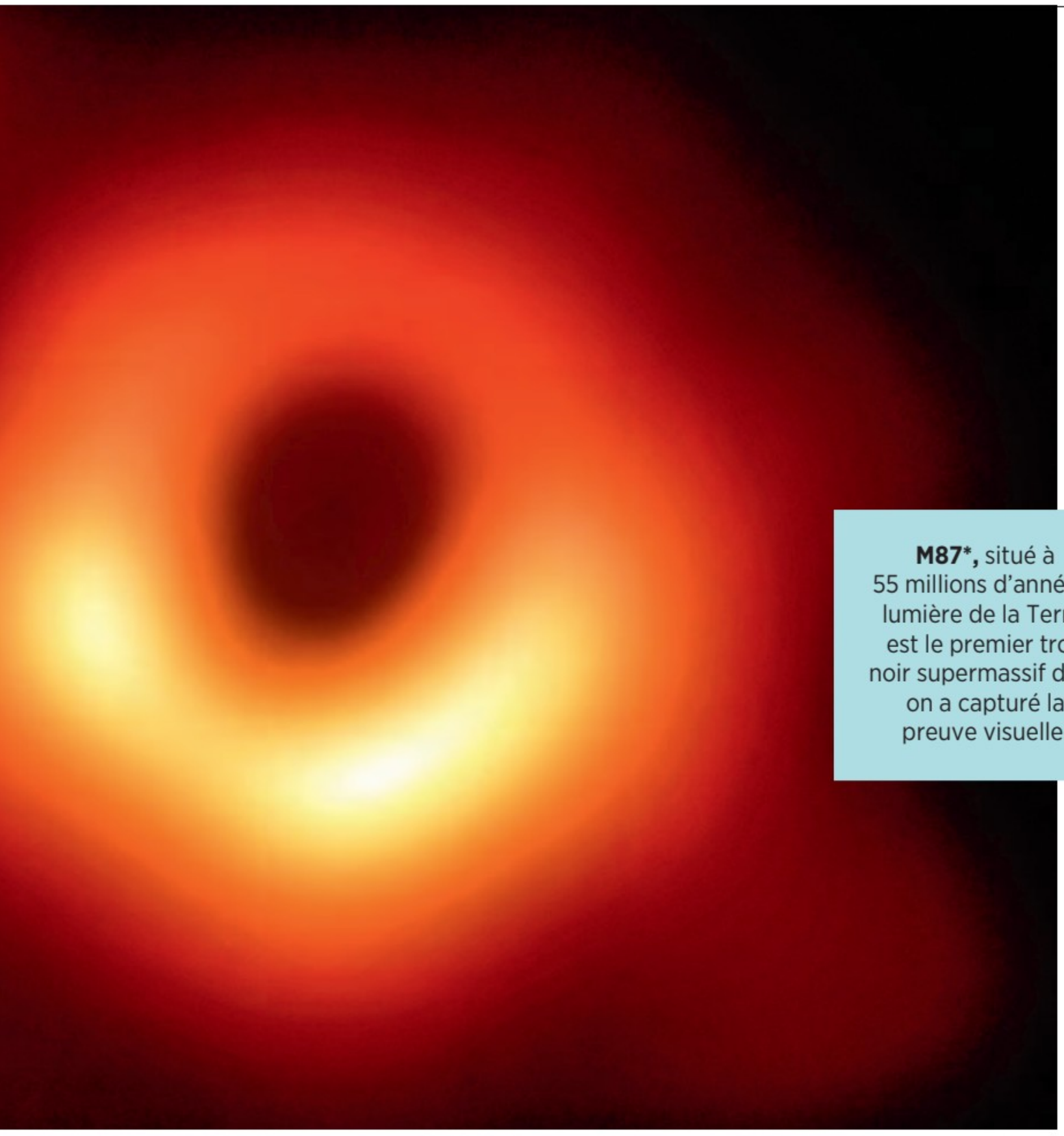

EHT COLLABORATION

« *Pour notre équipe, voir cette image et comprendre son impact en astronomie et en physique a suscité un mélange de stupéfaction, d'émerveillement, de fierté, de respect et d'humilité* », écrivait en 2020 l'astrophysicien américain Sheperd Doeleman, lors de la remise du Breakthrough Prize en physique fondamentale à la collaboration de 347 scientifiques qui a permis de capter la première image d'un trou noir. Cette image historique a été dévoilée le 10 avril 2019. *« Pour ceux d'entre nous qui avions travaillé plus de vingt ans sur ce projet,* se souvient le chercheur, *c'était un moment qui justifiait tous les efforts. L'impression que l'Univers nous avait enfin laissé entrevoir quelque chose de caché depuis l'aube des temps.* »
De fait, un trou noir — *a fortiori* les trous noirs supermassifs qui occupent le cœur de nombre de galaxies — est un objet céleste dont le champ gravitationnel est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper. Il déforme l'espace-temps et demeure invisible, à l'exception de ses effets sur la matière et la lumière qui s'en approche. Ces effets ont été d'abord simulés, à la fin des années 1970, par le Français Jean-Pierre Luminet, qui a montré que l'horizon des événements — la ligne de non-retour au-delà de laquelle toute information disparaît irrémédiablement dans le trou noir — et la gravité intense de cet astre devraient créer une zone sombre entourée d'un anneau de lumière.
Au fil des ans, les simulations théoriques se sont précisées, et en 2000, l'astrophysicien allemand Heino Falcke théorise le concept de « l'ombre du trou noir ». Il désigne ainsi la région sombre qui se découpe au sein du rayonnement électromagnétique émis par la matière chaude orbitant autour du trou noir. Cette silhouette résulte des effets de déflexion de la lumière à proximité de l'horizon des événements : l'ombre a ainsi un diamètre plus grand que ce dernier. Dans ce même article, Heino Falcke propose d'utiliser l'interférométrie radio à très longue base (VLBI, selon l'acronyme anglais) à des longueurs d'onde millimétriques pour observer l'ombre du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée, Sagittarius A* (Sgr A*). Il défend ensuite activement cette idée, à l'époque jugée très spéculative. Et en 2013, il parvient à obtenir une subvention de 14 millions d'euros du Conseil européen de la recherche pour soutenir ce projet, en vue de tester la théorie de la relativité générale.
La technique d'interférométrie à très longue base, testée pour la première fois en 1967, consiste à faire fonctionner simultanément des radiotélescopes, souvent séparés par des milliers de kilomètres, comme s'ils formaient un unique télescope d'une taille correspondant à la distance entre les antennes. Mais dans les

B. LACOMBE FOR THE BREAKTHROUGH PRIZE

« Nous avions l'impression que l'Univers nous avait enfin laissé entrevoir quelque chose de caché depuis l'aube des temps »

Sheperd Doeleman, astrophysicien. Il a dirigé l'équipe internationale qui a capturé la première image d'un trou noir



M87*, situé à 55 millions d'années-lumière de la Terre, est le premier trou noir supermassif dont on a capturé la preuve visuelle.

années 1990, le pouvoir de résolution des instruments demeure insuffisant pour distinguer l'horizon des événements. *« Il fallait faire progresser la technologie pour que la VLBI fonctionne à des fréquences très élevées,* explique Sheperd Doeleman. *En effet, le gaz de la Voie lactée situé entre la Terre et Sgr A* diffuse les ondes radio à basse fréquence, brouillant toute image possible ; à 230 gigahertz* [GHz], *cet effet s'atténue. D'autre part, le gaz chaud autour des trous noirs supermassifs est opaque aux ondes radio jusqu'à environ 230 GHz : il fallait donc atteindre cette fréquence pour voir à travers ce gaz jusqu'à l'horizon.* »

Le chercheur et son équipe développent de nouveaux instruments à large bande, augmentant considérablement la gamme de fréquences captées, et donc leur sensibilité. Dans le même temps, ils parviennent à combiner les signaux des 66 antennes du réseau Alma, au Chili, afin qu'elles fonctionnent comme une seule grande antenne. *« Mais, même avec ces avancées, rien ne garantissait que l'horizon du trou noir serait visible »*, remarque Sheperd Doeleman.

Un radiotélescope virtuel à l'échelle de la Terre

En 2006 et 2007, le chercheur et son équipe déploient plusieurs expériences en utilisant trois antennes situées à Hawaii, en Arizona et en Californie. *« Ces débuts furent exaltants,* se remémore l'astrophysicien. *Monter au sommet du Mauna Kea pour les premières expériences donnait l'impression d'être de véritables explorateurs, prêts à cartographier l'inconnu. Il fallait transporter des horloges atomiques sur chaque site et installer notre instrumentation sur mesure, sans savoir si elle fonctionnerait. Notre première tentative a échoué. Ce fut un coup dur. En 2007, nous avons ajouté le site californien, et cette fois nous avons détecté l'horizon de Sgr A*. Ce fut une révélation. Dès lors, le chemin était tracé.* »

Cette première convainc d'autres observatoires sur plusieurs continents de les rejoindre. Le projet Event Horizon Telescope (EHT) est lancé. De 2008 à 2012, une série d'expériences démontre que la technique de VLBI peut atteindre la précision requise pour imager un trou noir en faisant coopérer un réseau de télescopes, synchronisés à l'aide d'horloges atomiques, et ainsi créer un radiotélescope virtuel d'un diamètre équivalent à celui de la Terre. L'une des plus grandes difficultés, souligne Heino Falcke, était de composer avec *« des cultures différentes, des télescopes différents, des flux de financement différents et une manière totalement nouvelle de faire ce type de science en radioastronomie.* »

En 2017, le réseau est constitué de huit radiotélescopes. Leur première cible sera le trou noir central de la galaxie M87. Bien qu'il soit près de 20 000 fois plus distant que Sgr A*, il est bien plus massif avec 6,5 milliards de masses solaires, contre 4 millions de masses solaires pour ce dernier. Avec un horizon des événements plus grand, son diamètre angulaire apparent sur le ciel est ainsi comparable à celui de Sgr A* malgré la distance. Ses caractéristiques (rotation, variation de la luminosité, turbulence du gaz) sont aussi plus simples à analyser que celles de Sgr A*. Enfin, parce qu'il est situé hors de la Voie lactée, son image est moins perturbée par la diffusion provoquée par le milieu interstellaire dense de notre galaxie, qui brouille les ondes radio à basse fréquence, en particulier en direction du centre galactique.

Durant quatre nuits du début avril 2017, sept télescopes pointent leurs antennes au même moment vers M87, tandis que celui du pôle Sud, d'où M87 n'est pas

visible, enregistre les caractéristiques d'autres sources qui serviront à calibrer les tombereaux de données stockées sur 1024 disques durs. Ceux-ci rejoindront ensuite l'Institut Max-Planck de radioastronomie, à Bonn, en Allemagne et l'observatoire Haystack du MIT, près de Boston (États-Unis). Pour que leurs supercalculateurs puissent traiter ces données, il a fallu au préalable développer des techniques spécifiques d'analyse et de traitement. *« Cela a nécessité des années d'efforts d'une large équipe, testant sans relâche la chaîne de traitement sur des images simulées »*, souligne Sheperd Doeleman. En 2018, lorsque se concrétisent les premières ébauches d'images, *« nous avons immédiatement reconnu la forme annulaire. Après un dîner où l'on m'a montré ces données, je suis retourné dans mon bureau et j'ai rapidement calculé la taille de l'anneau : elle correspondait aux prédictions d'Einstein ! »*

La science-fiction transformée en réalité

La première image de l'ombre d'un trou noir confirme en effet de manière spectaculaire la validité de la théorie de la relativité générale à la limite d'un trou noir — un des rares endroits de l'Univers où elle aurait pu s'effondrer. *« C'était un rêve qui se concrétisait,* se souvient Heino Falcke. *Nous avons transformé la science-fiction en réalité. C'est un privilège que d'assister à l'écriture de l'histoire de la science et de pouvoir y contribuer. »* Les scientifiques ont utilisé cette image et les suivantes — celle qui montre la structure du champ magnétique de M87*, en 2021, et celle de Sgr A* en 2022 — pour étudier comment les trous noirs se nourrissent et croissent.

La collaboration internationale s'attache maintenant à réaliser des films montrant la dynamique de la matière qui s'écoule en spirale vers l'horizon des événements : le temps qu'elle met à en faire le tour fournira des indications sur la taille du trou noir. Pour cela, un nouveau télescope est construit en Namibie afin d'améliorer le réseau mondial de l'EHT. *« Nous soumettons également une proposition à l'ESA pour envoyer trois antennes paraboliques dans l'espace, afin de décupler la netteté des images des trous noirs et révéler leurs derniers secrets,* indique Heino Falcke. *Par exemple, peut-on vraiment extraire de l'énergie de leur rotation, comme le suggèrent les modèles ? »* ■ **Sylvie Rouat**

L'astéroïde est le vrai coupable de la disparition des dinosaures

CATASTROPHE

De nouvelles datations, réalisées en 2013, du cratère de Chicxulub, au Mexique, situent précisément l'impact il y a 66,04 millions d'années. Cette concordance parfaite avec la crise du crétacé confirme que l'astéroïde a joué un rôle central dans l'effondrement brutal des écosystèmes terrestres. Même si le volcanisme intense de l'époque a pu contribuer à les fragiliser. En 2008, la découverte du site de Tanis, en Amérique du Nord, a corroboré cette théorie puisqu'on arrive à y lire le déroulé de la catastrophe quasiment heure par heure. **J. I.**

AKG ; BETH ZAIKEN

ADN : des millions d'années gagnées

RECORD Il y a 25 ans, l'ADN ancien ne livrait que quelques fragments datés de moins de 100 000 ans. Aujourd'hui, il permet de reconstituer des écosystèmes vieux de 2 millions d'années. En 2022, des chercheurs ont extrait de l'ADN environnemental conservé dans le pergélisol du nord du Groenland, établissant ce nouveau record. Ces fragments ont révélé l'aspect de l'écosystème ancien de cette région. Et il était bien différent du désert blanc actuel : s'y dressait une forêt boréale peuplée de rennes, de lièvres, de lemmings, d'oies et même de mastodontes. **J. I.**

Dans la région du Petén, au nord du Guatemala, le lidar a permis de cartographier numériquement les vestiges de quelque 60 000 structures mayas dissimulées sous la canopée.

DR JUAN C FERNANDEZ-DIAZ - NCALM - PACUNAM LIDAR INITIATIVE (PLI)

Une nouvelle vision du monde maya grâce au lidar

Ce système de télédétection crée des modèles en 3D de la surface terrestre. Il a révélé un immense réseau de cités mayas.

S'il est une technologie qui a révolutionné l'archéologie au cours de ces dernières décennies, c'est bien celle du lidar (pour light detection and ranging en anglais, que l'on peut traduire par « détection et mesure par la lumière »). Introduit de façon expérimentale dans des contextes archéologiques dès les années 1990, ce système de télédétection, qui utilise des impulsions lumineuses pour mesurer les distances et créer des modèles en 3D de la surface terrestre, est devenu au milieu des années 2000 un outil incontournable pour identifier des structures enfouies sous une végétation dense ou dans des terrains difficiles d'accès, comme les jungles ou les montagnes.

Ruines d'Angkor au Cambodge, pyramides et tombes d'Égypte, montagnes arides de la vallée de Bactriane, en Afghanistan… Nombreux sont les endroits du monde à avoir été passés au crible par le lidar, avec des résultats fructueux. L'une des découvertes les plus spectaculaires obtenues par télédétection laser remonte incontestablement à 2018, lorsqu'une équipe de chercheurs a cartographié la région du Petén, au Guatemala. Elle y a détecté pas moins de 60 000 structures anciennes dissimulées depuis des siècles sous la canopée. Appartenant à la civilisation maya et datées de la période dite classique (250 à 900 ans après J.-C.), ces infrastructures complexes comprenaient des routes, des places et des structures pyramidales, ce qui a sans doute fait de ce réseau urbain un centre régional important au sein du monde maya.

Des centres urbains 40 fois plus vastes que sur les cartes

À peu près au même moment, dans la proche région mexicaine de Tabasco, c'est un surprenant centre cérémoniel maya qui a été identifié : celui d'Aguada Fénix, l'un des plus grands et des plus anciens jamais sortis de terre pour une civilisation mésoaméricaine. Couvrant près de 1,6 km², le site a été daté d'environ 1000 ans avant notre ère, soit bien avant l'apogée des cités classiques. *« Dans certains cas, les centres urbains mayas connus se sont révélés 40 fois plus vastes que ne le montraient les cartes existantes, y compris plusieurs complexes monumentaux considérés auparavant comme des sites distincts »*, expliquait en 2018 à *Sciences et Avenir* Francisco-Estrada Belli, de l'université de Tulane, à la Nouvelle-Orléans (États-Unis). Telle est l'une des grandes révélations du lidar : les Mayas ne vivaient pas uniquement dans quelques cités-États célèbres, comme Tikal ou Palenque, mais avaient un immense réseau de cités interconnectées. ■

Marine Benoit

Changement climatique : de l'intuition à la certitude

Depuis le début du siècle, la science du climat a prouvé le risque encouru par l'humanité d'un changement brutal de son environnement.

« *On sait tout depuis 1979.* » Volontiers provocateur, Jean Jouzel minimise ainsi le travail de milliers de scientifiques depuis la création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), en 1988, jusqu'à nos jours. 1979, c'est l'année où le météorologue américain Jule Charney (1917-1981) présente au Sénat des États-Unis les conclusions des premiers modèles climatiques construits dans les années 1960. « *Ce rapport affirme qu'avec un doublement des gaz à effet de serre, la température de la planète augmentera de 3 °C en quelques décennies, ce qui est en train de se passer* », poursuit le réputé climatologue français.

Cette très remarquable prédiction scientifique ne saurait cependant occulter les progrès accomplis dans la compréhension du fonctionnement de la Terre. Depuis le début de ce siècle, les interactions entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère — ce tissu vivant regroupant végétaux, champignons, micro-organismes et animaux —, sont décrites de plus en plus finement. Les connaissances sur notre planète ont littéralement explosé.

En 1979, Jule Charney et ses collègues n'ont à leur disposition que des ordinateurs en cours de développement de leur puissance et les premiers satellites utilisés pour affiner les prévisions météo. Mais ils bénéficient déjà d'une couverture sérieuse, au moins dans l'hémisphère Nord, des relevés de températures et de précipitations des stations météo remontant à la fin du XIX[e] siècle. C'est sur ces fondations que vont s'inscrire plus de trois décennies de modestes avancées, de petits pas en avant, d'amassement patient de données de plus en plus précises qui caractérisent la science en marche. « *Des instruments de mesure de plus en plus pertinents, une augmentation des puissances de calcul numérique ont permis de confirmer les affirmations du rapport Charney* », explique Jean Jouzel. Aujourd'hui, plus d'une centaine de modèles climatiques gérés par une cinquantaine de laboratoires ingèrent les données enregistrées partout dans le monde, ce qui permet d'affiner les scénarios élaborés pour décrire le climat du futur.

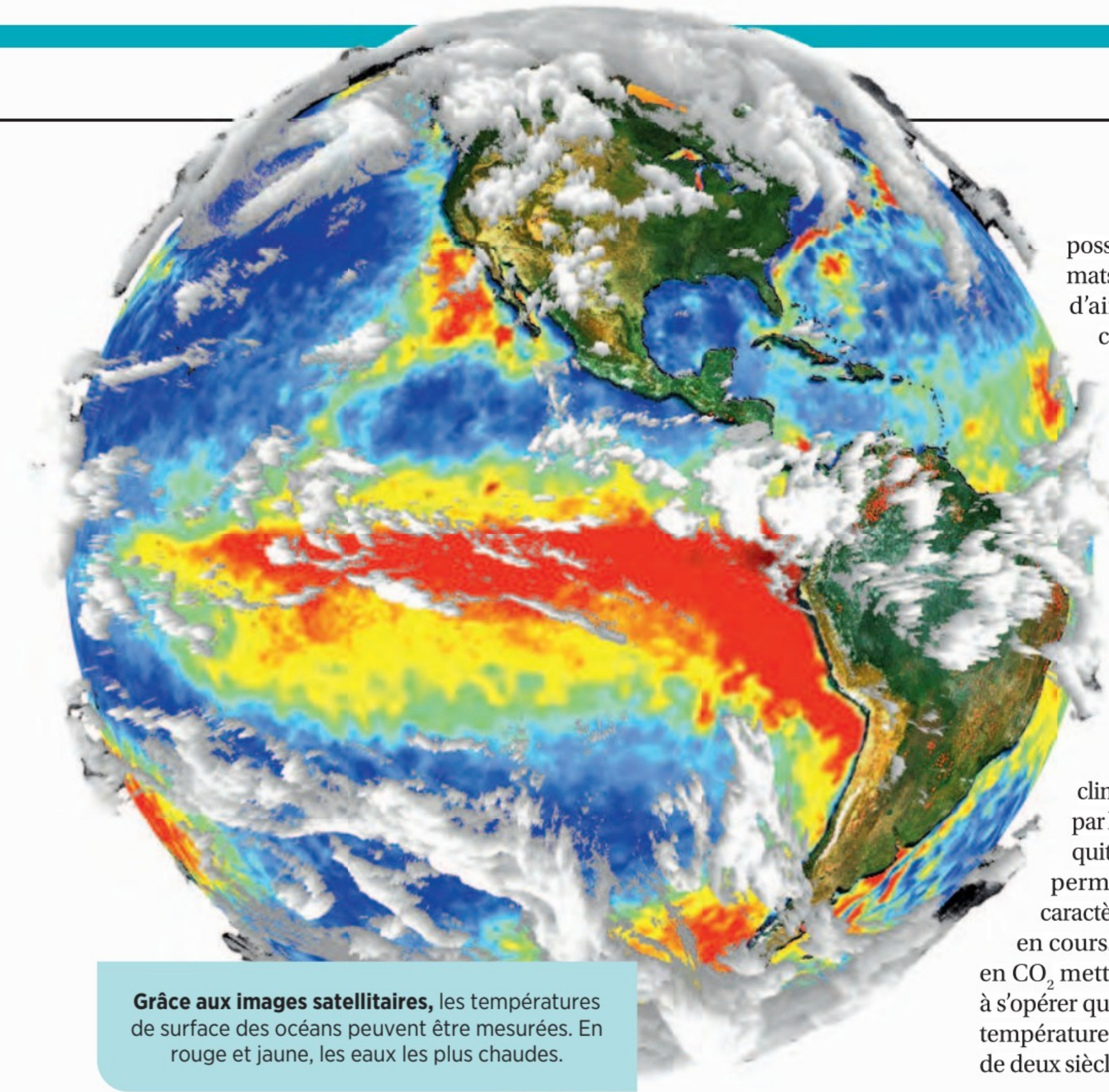
Des millions d'instruments de mesure ont été déployés

Car la création du Giec a complètement révolutionné des sciences de la Terre encore balbutiantes. « *Il a fallu répondre aux deux questions que les politiques nous posaient : le changement climatique est-il réel ? Quelle est la part de la responsabilité humaine ?* », se souvient Jean Jouzel. La réponse a été très progressive. En 1990, le premier rapport du Giec fait 180 pages et répond « *on ne sait pas* ». Le second rapport de 1995 dit « *peut-être* ». Le troisième en 2001 « *probablement* », le quatrième (2007) et le cinquième (2014) « *très probablement* ». En 2022, à la sixième livraison, il ne fait plus de doute pour la communauté scientifique que le changement climatique est en cours et qu'il est d'origine humaine. Ce sixième rapport fait plus de 20 000 pages.

Pour en arriver là, il a fallu déployer des millions d'instruments de mesure. Les flux de carbone entre les végétaux et l'atmosphère sont mesurés dans des tours échafaudées aux cœurs des massifs forestiers dans le monde entier. La respiration des sols, des marais, des tourbières, des prairies est traquée par des capteurs au sein de placettes représentatives d'écosystèmes de plusieurs millions d'hectares. La masse des glaciers continentaux, les inlandsis du Groen-

AFP

« Le Giec a dû répondre à deux questions : le changement climatique est-il réel ? Quelle est la part de la responsabilité humaine ? »
Jean Jouzel, climatologue



Grâce aux images satellitaires, les températures de surface des océans peuvent être mesurées. En rouge et jaune, les eaux les plus chaudes.

R. HUSAR, WASHINGTON UNIVERSITY

land et de l'Antarctique, la banquise de la mer Arctique sont surveillés d'abord par des campagnes scientifiques *in situ*, puis par l'imagerie satellite.

Le déploiement d'instruments scientifiques de plus en plus sophistiqués explique en grande partie les progrès obtenus. C'est particulièrement vrai pour l'océan. Jusque dans les années 1950, ils ne sont connus qu'en surface avec des mesures de température et de salinité de l'eau. Ce qui se passe dessous, c'est l'inconnu. Dans les années 1990, le programme international World ocean circulation experiment (Woce) débute les mesures de salinité, de température et de pression en profondeur. Au début des années 2000, l'Unesco lance le programme Argo d'installation de bouées scientifiques capables de mesurer des paramètres physico-chimiques jusqu'à 2000 mètres de profondeur. Il y en a 4000 aujourd'hui. Surtout, l'imagerie satellitaire change tout. Désormais, des dizaines de satellites enregistrent l'activité planctonique et donc l'absorption du carbone par l'océan, les évolutions de la glace de mer, les variations de température en instantané et jusqu'aux différences de niveaux de surface qui trahissent les courants. On comprend mieux les échanges entre l'atmosphère et l'océan, entre l'atmosphère et les continents, entre l'atmosphère et les zones englacées. Les flux de CO_2, le principal gaz à effet de serre, font alors l'objet de bilans de plus en plus précis, désormais fournis annuellement par le Global carbon project (GCP).

Il faut aussi comprendre en quoi la période actuelle de changement climatique est absolument unique dans l'histoire de la Terre. En 1957, le glaciologue français Claude Lorius comprend qu'il est possible de reconstituer les climats du passé grâce aux bulles d'air emprisonnées dans les couches de glace. En janvier dernier, les chercheurs du programme international Beyond epica-oldest ice (BE-OI) ont annoncé avoir réussi l'extraction de carottes vieilles de 1,2 million d'années au sein de la calotte glaciaire de l'Antarctique. Les échantillons sont en cours d'analyse. Ils vont permettre de reconstituer avec une précision inégalée les fluctuations climatiques naturelles induites par la distance au Soleil et l'obliquité de la planète. Ces travaux permettent de comprendre le caractère inédit du réchauffement en cours. Les variations de teneur en CO_2 mettent des milliers d'années à s'opérer quand la hausse actuelle des températures est intervenue en moins de deux siècles.

Des événements météo influencés par l'activité humaine

Les progrès des modèles informatiques ont été tels qu'aujourd'hui, les climatologues peuvent précisément attribuer à l'influence humaine des événements météorologiques de plus en plus violents. Depuis 2015, un nouveau domaine scientifique s'est ouvert, celui de l'attribution. *« Il s'agit de déterminer si un événement est un fait rare qui sort des probabilités ou s'il s'inscrit normalement dans un système, par exemple le fonctionnement de l'atmosphère, où des événements grands et petits reviennent plus ou moins périodiquement »*, explique Davide Faranda, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Les modèles ont tellement gagné en précision que l'on peut désormais comparer, par exemple, un cyclone intervenu dans l'atmosphère actuelle, d'une concentration en CO_2 de ▶

420 parties par million (ppm), avec ce qu'il aurait été dans une atmosphère à 280 ppm telle qu'elle était au début de l'ère industrielle.

Dans ces premières vingt-cinq années du XXIe siècle, la science du climat a ainsi prouvé définitivement le risque encouru par l'humanité d'un changement brutal de son environnement. Le Giec en a été récompensé par le prix Nobel de la paix en 2007. Ses résultats scientifiques servent de base aux 195 États signataires de la Convention onusienne sur le changement climatique pour décider des politiques d'atténuation des gaz à effet de serre et d'adaptation à des conditions météorologiques qui changent. En 2015, l'accord de Paris enjoint la communauté internationale à tout faire pour limiter la hausse de la température mondiale *« en dessous de 2 °C »*. Il s'agit de sortir de la combustion des énergies fossiles pour adopter les énergies renouvelables.

Un bilan très mitigé, dix ans après l'accord de Paris

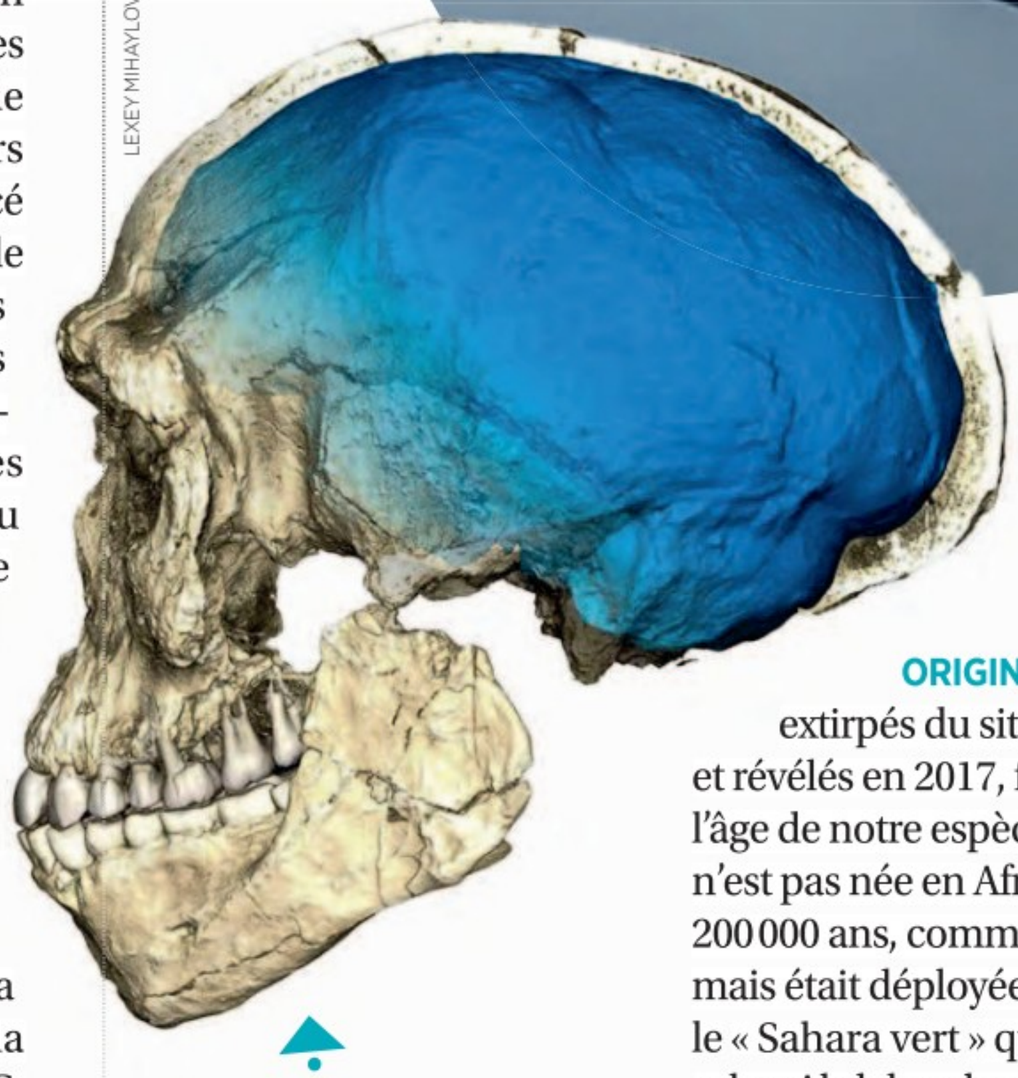
Pour son dixième anniversaire, le bilan de cet accord est très mitigé. En 2024, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont continué d'augmenter alors qu'elles devraient déjà avoir commencé à baisser. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon restent les premières sources énergétiques utilisées. Mais les plus optimistes font remarquer que le photovoltaïque et l'éolien, deux sources marginales d'électricité au début du siècle, sont aujourd'hui celles qui se développent le plus vite à des coûts de plus en plus faibles, au point que les investissements dans le solaire et le photovoltaïque ont dépassé ceux dans les énergies fossiles pour la première fois en 2024.

La prévision de Jule Charney est cependant en cours de réalisation. Pour la première fois en 2024, la hausse de la température mondiale a dépassé 1,5 °C. Une inversion de la courbe est espérée pour le début de la prochaine décennie, au mieux. *« On joue avec le feu »*, s'inquiète Jean Jouzel. ■ **Loïc Chauveau**

Quatre lionceaux des cavernes émergent des glaces

DÉGEL En 2015, Uyan et Dina, deux nouveau-nés ensevelis dans leur tanière, ont été les premiers lionceaux des cavernes découverts dans le pergélisol de Sibérie. Particulièrement bien conservés, avec poils, moustaches, coussinets, musculatures et organes internes malgré leurs 46 500 ans. En 2017, deux autres petits *Panthera spelaea*, Boris et Sparta, âgés de 33 000 et 28 000 ans, ont été mis au jour dans cette couche qui dégèle en raison du réchauffement climatique. **R. F.**

LEXEY MIHAYLOV - PHILIPP GUNZ, MPI EVA LEIPZIG



Homo sapiens vieillit de 100 000 ans

ORIGINES Cinq individus fossiles, extirpés du site de Jebel Irhoud au Maroc et révélés en 2017, font reculer de 100 000 ans l'âge de notre espèce *Homo sapiens*. Celle-ci n'est pas née en Afrique de l'Est il y a environ 200 000 ans, comme l'estimait la génétique, mais était déployée il y a 300 000 ans, dans le « Sahara vert » qu'était alors l'Afrique, selon Abdelouahed ben-Ncer, de l'Institut national d'archéologie et du patrimoine marocain, et Jean-Jacques Hublin, alors à l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste (Allemagne). **R. F.**

La percée des implants cérébraux

Après des dizaines d'essais prometteurs, ces dispositifs connectés vont révolutionner la prise en charge des personnes avec un handicap moteur.

Les intentions de mouvement sont transmises par l'implant cérébral à des électrodes situées sur la zone de la moelle épinière contrôlant la marche.

EPFL, JEREMY RAVIER

Depuis l'an 2000, plusieurs paralysés se sont levés et ont remarché. En particulier grâce aux implants cérébraux les plus aboutis, conçus à Grenoble par des scientifiques du centre de recherches Clinatec. Ainsi, en 2019, un tétraplégique s'est déplacé en contrôlant un exosquelette par la pensée. En 2023, le dispositif a permis à un autre patient tétraplégique (à la suite d'une lésion de la colonne vertébrale) de remarcher, grâce à un implant localisé dans sa moelle épinière. Dans le premier cas, l'implant décodait la volonté du patient ; dans le deuxième, il activait les nerfs contrôlant ses jambes, contournant ainsi la lésion qui ne permet plus la connexion normale entre cerveau et membres inférieurs.

Lire l'activité du cerveau pour la transformer en commande

Contrôler un ordinateur par la pensée, décoder la parole, transformer la volonté de l'utilisateur en commande pour des robots… Les implants cérébraux promettent de révolutionner la prise en charge des personnes avec un handicap moteur. Une soixantaine de personnes ont déjà utilisé l'un de ces dispositifs, principalement aux États-Unis. Dans presque tous les cas, l'utilisateur était paralysé en raison d'un traumatisme de la colonne vertébrale, une maladie neurodégénérative ou un accident vasculaire cérébral.

Le principe de ces implants consiste à lire l'activité du cerveau pour ensuite envoyer cette information à un ordinateur où elle sera décodée et transformée en commande. Ainsi, une machine peut accomplir l'action que l'utilisateur ne peut plus faire lui-même en raison de son handicap.

L'exemple le plus médiatisé de ces interfaces cerveau-machine est celui de Neuralink, entreprise du milliardaire américain Elon Musk. Trois personnes ont déjà reçu un de ses dispositifs, qui leur a permis de contrôler un ordinateur et de jouer à des jeux vidéo. Le dernier coup médiatique de la start-up date du 28 avril, lorsque l'un de ces utilisateurs, atteint de la maladie de Charcot, ne pouvant plus bouger que ses yeux et devant utiliser un appareil pour la respiration, a mis en ligne une vidéo. Il y explique avoir réalisé toute l'édition de la vidéo en déplaçant la souris par la pensée. De même pour le texte qui a ensuite été lu par une intelligence artificielle imitant sa voix d'avant la maladie.

De nouveaux implants voient le jour régulièrement. Certains parviennent aujourd'hui à décoder directement la volonté de parole du patient, avec une fiabilité pouvant atteindre 97 %. Le dernier en date est celui développé en Australie par la compagnie de biotech Synchron pour piloter des objets par la pensée. Beaucoup moins invasif que ses prédécesseurs, il est introduit par la veine jugulaire afin d'atteindre le cerveau. Et une dizaine d'autres types d'implants sont en phase de test. La révolution des implants cérébraux ne fait que commencer. ■

Nicolas Gutierrez C.

Les cellules CAR-T (ronds bleus et verts) du patient ont été modifiées pour s'attaquer aux cellules tumorales, ici dans un cancer du col de l'utérus (vue au microscope).

Les promesses anticancer de l'immunothérapie

Ces traitements stimulent et améliorent le système immunitaire pour cibler les cellules tumorales. Prochaine étape : des vaccins ARN individualisés.

« *Objectif 2040 : 80 % des patients guéris* », annonçait en janvier l'Institut Gustave-Roussy, à Villejuif, référence dans la prise en charge du cancer. Pour son directeur général Fabrice Barlesi, « *l'impact des immunothérapies sera majeur* », et concernera quasiment « *l'ensemble des malades* ». Le principe est de s'appuyer sur le système immunitaire du patient en en améliorant l'efficacité et la spécificité. Aujourd'hui, les immunothérapies sont capables de « *lever le masque présent sur les cellules tumorales* » qui empêchaient jusque-là les cellules immunitaires de les détruire, explique de son côté le Pr Nicolas Girard, à l'Institut Curie, à Paris. Les anticorps anti-PDL1, dont le premier (Yervoy) a été approuvé en 2011 en Europe, empêchent par exemple les cellules tumorales de passer pour des cellules saines auprès des lymphocytes (globules blancs). « *Parmi les immunothérapies, les* immune checkpoints [inhibiteur de point de contrôle] — *ou ICI — comme anti-PDL1 sont les plus avancés avec plus de 11 ICI approuvés aux États-Unis, dans plus de 43 indications* », détaille Fabrice Barlesi.

Activer la mémoire immunitaire du patient

Les cellules CAR-T, ces lymphocytes du patient modifiés en laboratoire pour cibler la tumeur, « *ont aussi des indications claires en hématologie avec six enregistrements pour six indications* », dont la première (Kymriah) a été approuvée en 2018 en Europe. Encore mieux, les immunothérapies induisent un effet vaccinal en activant la mémoire immunitaire. « *On peut donc arrêter le traitement et le système immunitaire du patient prend le relais* », explique Nicolas Girard. « *Ça marche encore mieux sur les tumeurs les plus petites. Dans le cancer du poumon avec juste trois injections d'immunothérapie, près d'un tiers des malades n'ont plus de cellules cancéreuses !* » Malheureusement, 60 % des patients finissent par ne plus répondre à l'immunothérapie, sans que les raisons en soient connues. D'ici à ce que l'on en sache plus, le futur de ces traitements passera probablement par les vaccins, notamment ARN, « *soit universels, soit personnalisés en fonction de la tumeur du patient* », avance Nicolas Girard, « *principalement au stade de dépistage précoce des personnes à risque* ». Pour Fabrice Barlesi aussi, « *les vaccins ARN sont certainement une piste pour combiner sur mesure rapidité de développement, sécurité et coûts* ». Des études cliniques explorent déjà cette option dans les cancers ORL, digestifs et thoraciques. En outre, des immunothérapies appelées bispecific T-Cell Engagers semblent également prometteuses. Le Blincyto est la première d'entre elles à avoir été approuvée en Europe, en 2015. Ces anticorps se lient à la fois à un récepteur spécifique de la tumeur et au récepteur TCR des lymphocytes T pour les activer et les attirer vers les cellules malignes, et ont montré leur efficacité dans des cancers du poumon. ■ **Camille Gaubert**

STEVE GSCHMEISSNER/SPL/SUCRÉ SALÉ

L'ARN ou la revanche des insignifiants

Les recherches sur cette molécule ont permis des avancées majeures dans le développement de vaccins ou de médicaments.

Tapi dans l'ombre tutélaire de la double hélice d'ADN, l'ARN attendait le moment de sa consécration. Car si, dès 1953 et la parution dans *Nature* de son aspect hélicoïdal fascinant, la molécule d'acide désoxyribonucléique, ou en abrégé ADN, fut reconnue très vite comme celle qui allait ouvrir la voie à des perspectives insoupçonnées sur la transmission des caractères héréditaires et la mutation des espèces vivantes, l'ARN, lui, était à ce moment-là considéré comme quantité négligeable. Plus petit que son cousin, plus fugace et moins complexe, l'acide ribonucléique n'était alors vu que comme une molécule transitoire peu digne d'intérêt.

Tous les ARN sont constitués d'un seul brin d'acides nucléiques (quand l'ADN en compte deux). Seuls changent la composition, le nombre d'acides nucléiques ainsi que la structure tridimensionnelle que ce brin adopte en « s'emberlificotant ». C'est grâce à cette molécule *a priori* insignifiante que la technologie vaccinale a réalisé un bond de géant lors de la pandémie de Covid-19. Des vaccins s'appuyant sur un des avatars de l'ARN, l'ARNm (pour messager), ont permis de mettre au point et distribuer en un temps record des armes contre le Sras-CoV-2. Une réussite couronnée par un prix Nobel en 2023, décerné aux deux développeurs de cette technique révolutionnaire, la Hongro-Américaine Katalin Karikó et l'Américain Drew Weissman.

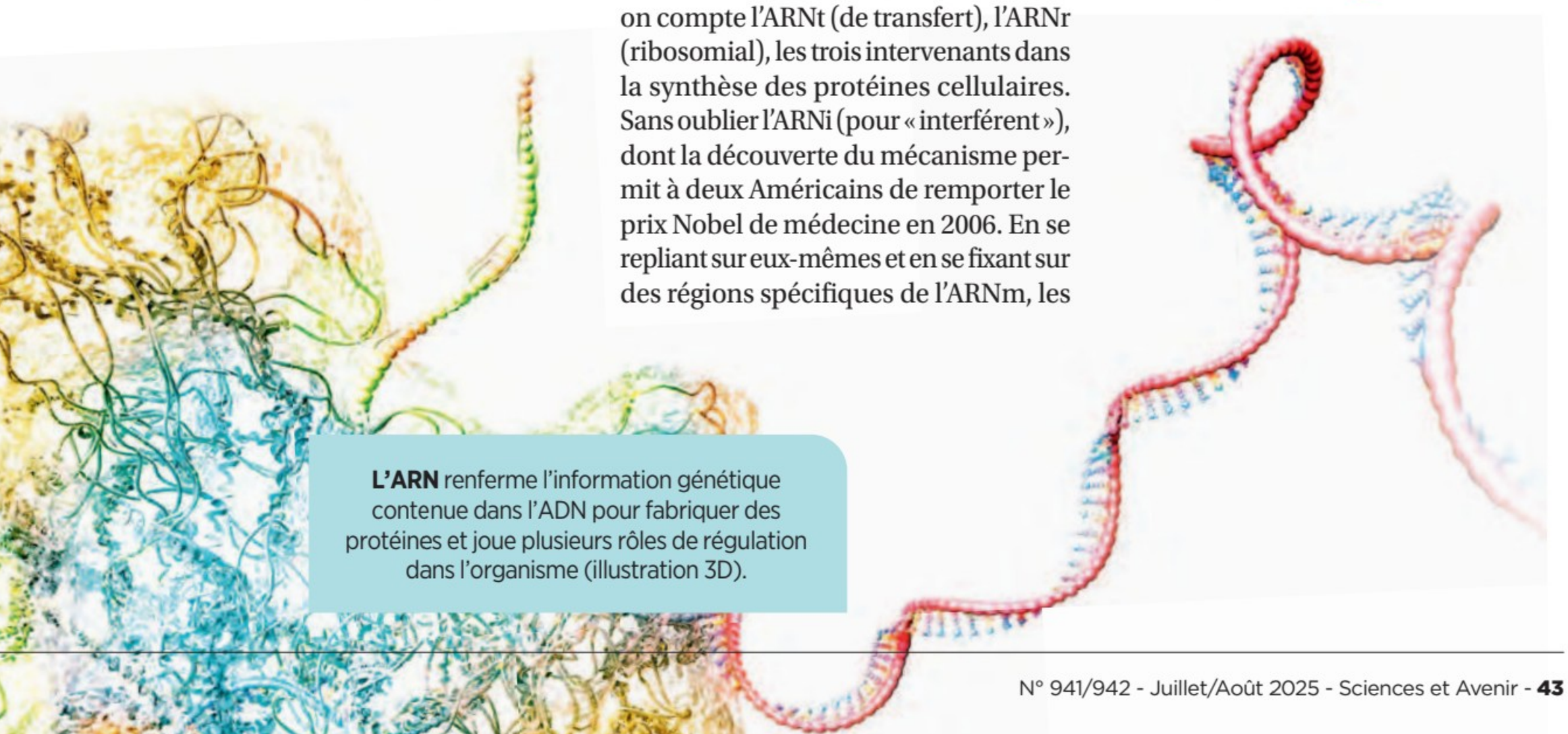
Entre-temps, l'ARN s'était révélée une molécule multiple. En plus de l'ARNm, on compte l'ARNt (de transfert), l'ARNr (ribosomial), les trois intervenants dans la synthèse des protéines cellulaires. Sans oublier l'ARNi (pour « interférent »), dont la découverte du mécanisme permit à deux Américains de remporter le prix Nobel de médecine en 2006. En se repliant sur eux-mêmes et en se fixant sur des régions spécifiques de l'ARNm, les petits ARNi jouent un rôle de régulation de la production protéique. Impliqués dans différentes pathologies, les ARNi ont déjà donné lieu à des médicaments indiqués dans quelques maladies rares.

Des outils essentiels à l'édification des êtres vivants

Plus récemment, c'est un autre avatar de l'ARN qui s'est retrouvé sous les feux de la rampe. En 2024, le prix Nobel de médecine récompensait deux biologistes américains pour avoir découvert le rôle des micro-ARN dans la régulation de nos gènes. Permettant ainsi de répondre à cette énigme fondamentale : puisque toutes les cellules de notre corps possèdent le même ADN et dérivent d'une cellule originelle, pourquoi certaines deviennent des cellules du foie, d'autres des neurones, d'autres du sang, etc. ?

Preuve qu'ils sont des outils essentiels à l'édification des êtres vivants, certains micro-ARN ont été étonnamment conservés au cours de l'évolution. Des éponges aux reptiles, en passant par les nématodes et les êtres humains, toutes ces espèces ont en commun de posséder les mêmes micro-ARN… Beaucoup de recherches sont en cours pour développer des tests diagnostiques et des thérapies à partir de ces molécules contre des cancers, des troubles métaboliques ou des maladies neurodégénératives. ■

Hervé Ratel



C. BURGSTEDT/ ALAMY/ PHOTO12

L'ARN renferme l'information génétique contenue dans l'ADN pour fabriquer des protéines et joue plusieurs rôles de régulation dans l'organisme (illustration 3D).

Les nouvelles messagères du cosmos

Il y a dix ans, une onde gravitationnelle était détectée pour la première fois par l'interféromètre Ligo, confirmant une prédiction centenaire d'Albert Einstein. Ce signal, né de la fusion de deux trous noirs, a marqué l'acte de naissance de l'astronomie gravitationnelle, à l'écoute des astres les plus compacts de l'Univers.

Lundi 14 septembre 2015, à 10 h 50, heure de Paris, l'espace-temps se met à trembler. Une cascade d'ondes gravitationnelles déferle sur la Terre. Elles sont nées de la fusion de deux trous noirs situés à 1,3 milliard d'années-lumière de nous. Les deux monstres de 29 et 36 masses solaires ont entamé une spirale infernale avant de se heurter et de fusionner en un seul astre. Le choc a été tel qu'il a fait vibrer l'espace-temps, comme un caillou jeté dans un lac fait onduler sa surface. Et pour la première fois dans l'histoire, cette vibration a été captée par un instrument. Les interféromètres jumeaux de Ligo aux États-Unis, séparés de 3000 km, ont saisi ces ondes prédites par Albert Einstein un siècle plus tôt. Le père de la relativité générale doutait alors qu'on puisse les détecter un jour. C'est bien le seul point sur lequel il s'était trompé…

À peine le signal enregistré, l'alerte est lancée au sein de la collaboration scientifique internationale qui regroupe plus de 1000 scientifiques, dont les chercheurs de Virgo en Europe. Ceux-ci finissent la mise au point de leur propre détecteur situé près de Pise en Italie, encore en travaux au moment de la détection, mais une partie d'entre eux participent à l'analyse des données de Ligo.

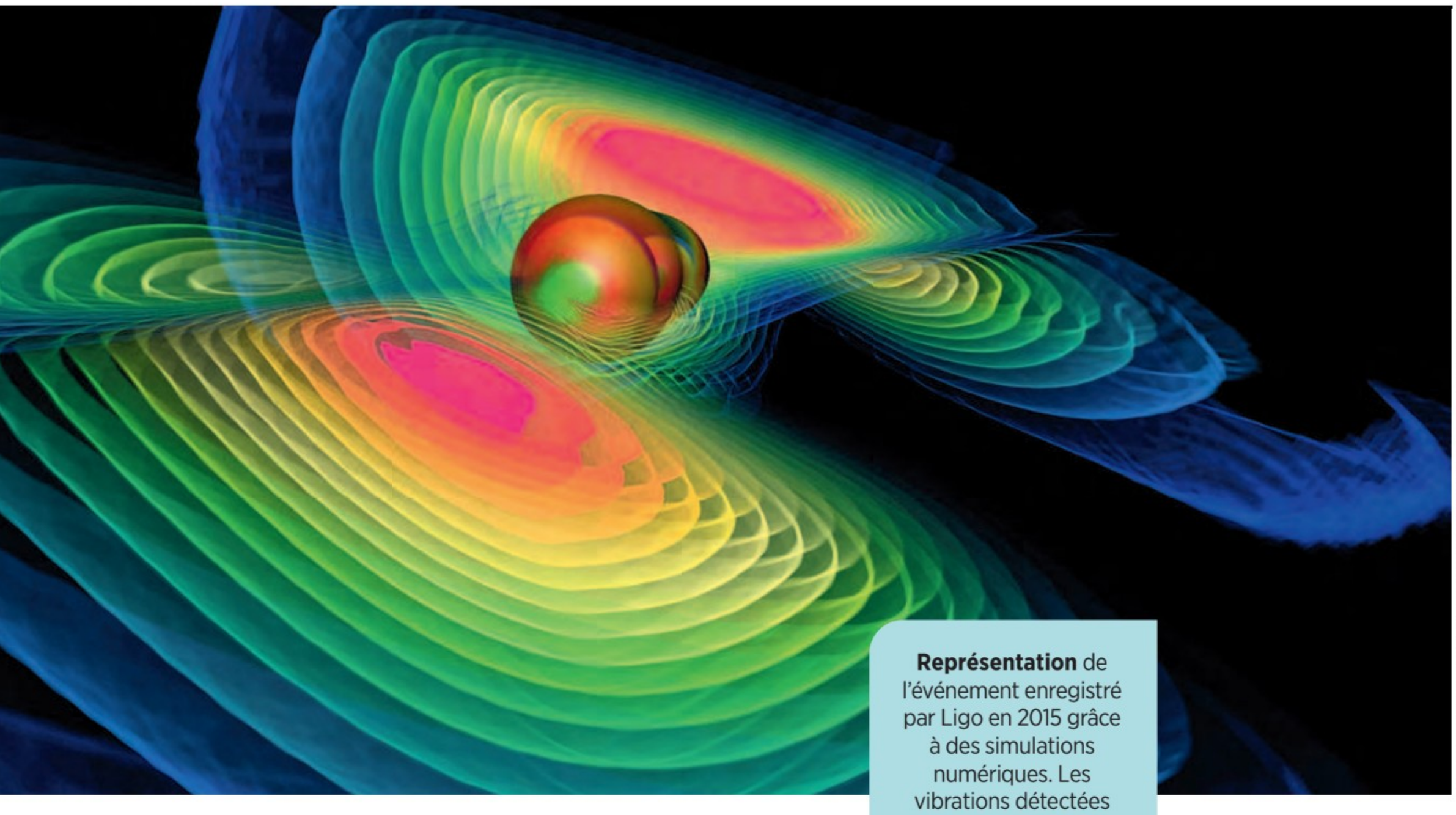
Le signal est bref, à peine 0,2 seconde, mais parfaitement net. Trop, même : *« Le signal était si parfait qu'on peinait à croire qu'il fût réel. On a d'abord cru à une fausse alerte, destinée à tester nos capacités à détecter un tel événement. De nombreux exercices de ce type avaient déjà eu lieu »*, se souvient Éric Chassande-Mottin, chercheur au CNRS et directeur du laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC), situé à l'université Paris Cité. En 2015, il était le coordinateur du groupe chargé d'identifier les signaux gravitationnels. Or, cette fois, ce n'est pas un exercice. *« Il a fallu quelques heures pour réaliser, mais je me souviens d'un grand moment d'excitation »*, raconte le chercheur. En coulisses, la nouvelle se répand comme une traînée de poudre dans la communauté scientifique. Mais il faudra attendre la parution de l'article officiel dans *Physical Review Letters* le 11 février 2016 pour que la plus grande découverte en physique de ces dernières décennies devienne officielle.

Pour les artisans de Virgo/Ligo, il aura fallu la foi du charbonnier pour en arriver là. Catherine Nary Man, spécialiste des lasers et de l'interférométrie au CNRS, désormais retraitée, était présente au tout début du projet en 1994, l'année où fut prise la décision de construire Virgo. Elle se souvient des réticences, pour ne pas dire plus, de certains de ses collègues. *« Au départ, on nous disait : "Vous n'y arri-*

ÉRIC CHASSANDE-MOTTIN

« On s'est dit : "C'est bon, c'est parti." On savait qu'une nouvelle fenêtre sur l'Univers venait de s'ouvrir »

Éric Chassande-Mottin, chercheur au CNRS, directeur du laboratoire Astroparticule et cosmologie



MAX PLANCK INSTITUTE FOR GRAVITATIONAL PHYSICS / ZUSE INSTITUTE BERLIN / CENTER FOR COMPUTATION & TECHNOLOGY AT LOUISIANA STATE UNIVERSITY

Représentation de l'événement enregistré par Ligo en 2015 grâce à des simulations numériques. Les vibrations détectées de l'espace-temps sont nées de la fusion de deux trous noirs.

verez pas. Et même si vous y parvenez, vous verrez un événement tous les trente ans." Ce n'était pas très encourageant », confie-t-elle aujourd'hui en riant. La méthode choisie repose sur l'interférométrie, seule capable de mesurer les infimes contractions de l'espace causées par le passage de l'onde : l'équivalent de la taille d'un atome… sur la distance Terre-Soleil. Sur le papier, le principe semble simple : un faisceau laser est divisé en deux, chaque rayon parcourant un bras perpendiculaire de l'interféromètre. Ils sont réfléchis par des miroirs, puis recombinés. Si les bras sont parfaitement égaux, les deux ondes lumineuses s'annulent. Mais si une onde gravitationnelle modifie la longueur de l'un des bras, une variation lumineuse trahit son passage.

Traduire ce principe en réalité instrumentale relève de l'exploit technologique. La précision requise impose notamment une course au gigantisme. Dans les années 1980, les Américains et les Allemands construisent déjà des prototypes de 30 à 40 mètres. Mais en France, une petite équipe, menée par Alain Brillet et Catherine Nary Man (CNRS) ainsi que Jean-Yves Vine (École nationale supérieure de techniques avancées), opte pour une autre stratégie : un modèle réduit, rigide, posé sur un simple banc optique. Objectif : valider pas à pas les technologies nécessaires. « *En général, quand vous concevez une nouvelle expérience de laboratoire, il y a un point ou deux qui sont à la limite de la technologie actuelle,* explique Catherine Nary Man. *Ici, tout était à la limite : le laser, les optiques, les miroirs. On devait faire attention à tout, ce qui était impossible avec les grandes installations de nos concurrents. Grâce à notre montage, nous avons pu nous attaquer à chaque problème individuellement, et résoudre une à une les difficultés.* »

Lasers puissants, miroirs géants, suspensions ultrastables…

Finalement, les bras de Ligo et de Virgo mesureront respectivement 4 km et 3 km. Il faudra des lasers de 20 à 40 watts (mille fois la puissance d'un pointeur laser standard) et des miroirs géants pour canaliser des faisceaux élargis à 20 cm après avoir parcouru des kilomètres, un vide quasi absolu sur toute la distance, des suspensions ultrastables, et un alignement à quelques millionièmes de degré près. « *On ne peut pas empêcher la Terre de vibrer. Un simple camion à un kilomètre suffit à fausser les mesures. D'où l'extrême sophistication des systèmes d'amortissement* », explique encore la chercheuse. Ligo est achevé en 2002, Virgo en 2003. Mais de nombreuses mises à niveau techniques seront nécessaires avant la détection historique de 2015.

Dès décembre de la même année, un second signal, bien net, est détecté. Un troisième survenu en octobre sera découvert *a posteriori*, après une analyse plus fine. « *Alors on s'est dit : "C'est bon, c'est parti." On savait qu'une nouvelle fenêtre sur l'Univers venait de s'ouvrir* », se souvient Éric Chassande-Mottin.

Bien plus qu'une validation de la relativité générale, les ondes gravitationnelles offrent un regard nouveau sur l'Univers, sensible uniquement aux masses en mouvement, même si ces astres n'émettent aucun rayonnement, comme certains trous noirs. En août 2017, Virgo est enfin opérationnel, et un autre jalon est franchi avec GW170817 :

la première fusion d'étoiles à neutrons détectée simultanément par Ligo et Virgo. Surtout, grâce à l'observation par trois détecteurs, elle est localisée précisément et cela permet de braquer les télescopes optiques vers la cible. Un flash de rayons gamma est enregistré deux secondes après le signal gravitationnel. Et une source lumineuse éclaire brièvement la galaxie NGC 4993. C'est donc de là qu'est parti le train d'ondes, lors de la collision des deux étoiles à neutrons. L'astronomie dite multimessager acquiert une nouvelle dimension. *« GW170817 constitue un événement majeur dans ce domaine,* souligne le chercheur. *Nous nous attendions à en voir d'autres. Hélas, les nouvelles détections conjointes se font attendre.* »

Mais c'est bien la seule déception. En dix ans, une centaine d'événements ont été recensés, révélant peu à peu une démographie des objets compacts : masses, distributions, fréquences… L'Univers sombre se dévoile. Avant la fin de l'année, la quatrième campagne d'observations, démarrée en mai 2023, sera révélée. On sait déjà qu'elle a été fructueuse…

La quête de la « rumeur » des trous noirs dans l'Univers

Cette moisson alimente notamment l'espoir de découvrir un jour le fond gravitationnel de l'Univers. *« C'est une sorte de rumeur des trous noirs dans le cosmos,* résume joliment Éric Chassande-Mottin. *Un peu comme lorsque l'on se trouve dans un cocktail : on ne parvient pas à comprendre les conversations, mais le niveau de bruit global nous indique la taille de la foule.* » Cette « rumeur » est en effet issue de la superposition d'ondes résultant d'une multitude de fusions lointaines, trop faibles pour être isolées individuellement.

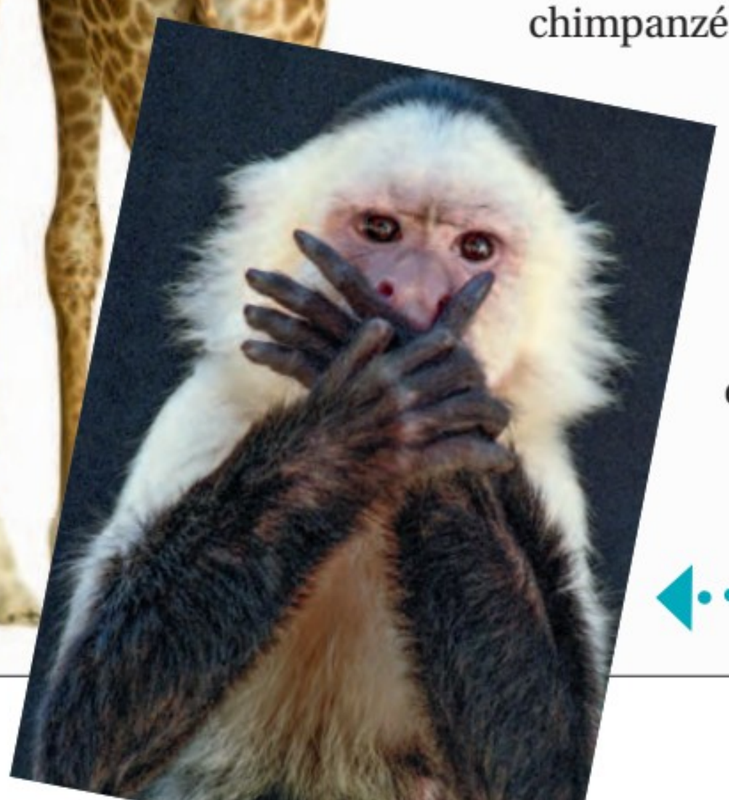
Ce signal diffus n'est qu'un des nombreux objectifs de l'astronomie gravitationnelle née en 2015, et qui s'apprête à changer d'échelle. En Europe, le projet Einstein Telescope doit voir le jour dans la prochaine décennie : un observatoire souterrain, plus sensible, capable de capter des signaux plus faibles et plus lointains. À l'horizon 2035, ce sera au tour de la mission spatiale Lisa, développée par l'Agence spatiale européenne, de traquer les ondes gravitationnelles depuis l'espace. La lumière n'est décidément plus la seule messagère des astres, il faut compter désormais sur les vibrations de l'espace-temps… ■ **Fabrice Nicot**

La sixième extinction est en marche

BIODIVERSITÉ Au moins 150 000 espèces vivantes auraient disparu en une poignée de siècles, avec une accélération dramatique croissante depuis 1950. Une espèce d'oiseau sur huit, un mammifère sur quatre ont disparu. Les populations d'insectes ont chuté de 80 % dans les pays européens. C'est la sixième extinction de masse qu'a connue notre planète, mais la première causée par l'être humain. Pollution, réchauffement climatique, surexploitation agricole, déforestation, surpêche et chasse nous ont plongés dans un monde écologiquement bien plus pauvre. **H. R.**

Les primates aussi font grève face à l'injustice

ÉTHIQUE Quand un singe capucin est moins bien rétribué que son voisin pour une même tâche, il se met en grève, tout en protestant vigoureusement, a montré en 2004, le Néerlandais Frans de Waal (1948-2024). Le primatologue a d'abord donné du concombre à tous contre des cailloux, puis du raisin, plus sucré, à certains seulement, déclenchant cette *« aversion pour l'iniquité »*. Les chimpanzés ont un sens de l'équité plus poussé encore : celui qui reçoit le raisin n'en veut pas tant que l'autre n'en a pas eu. **R. F.**



MICHEL & CHRISTINE DENIS-HUOT / BIOSPHOTO - RYAN MCVAY/ GETTY IMAGES

L'avènement du microbiote

Les milliards de bactéries qui peuplent les intestins, les poumons, la bouche, la peau ou l'appareil génital jouent un rôle vital dans l'équilibre de l'organisme.

Longtemps *terra incognita*, le microbiote humain n'a commencé à se dévoiler à la communauté scientifique qu'au début des années 2000, lorsque furent employés des outils d'imagerie moléculaire et de séquençage à haut débit des génomes.

Le microbiote est un véritable organe, fort de 3 kg de bactéries. Il s'étale sur toute la surface de notre corps et à tous les niveaux. Les bactéries du nez participent à la production de mucus ; celles de la bouche facilitent la digestion ; les bactéries des poumons lubrifient les parois des organes ; celles de l'estomac évitent les problèmes gastriques ; celles du côlon permettent de digérer les molécules trop complexes ; et les bactéries de notre peau renforcent le système immunitaire.

Un dialogue permanent avec l'organisme

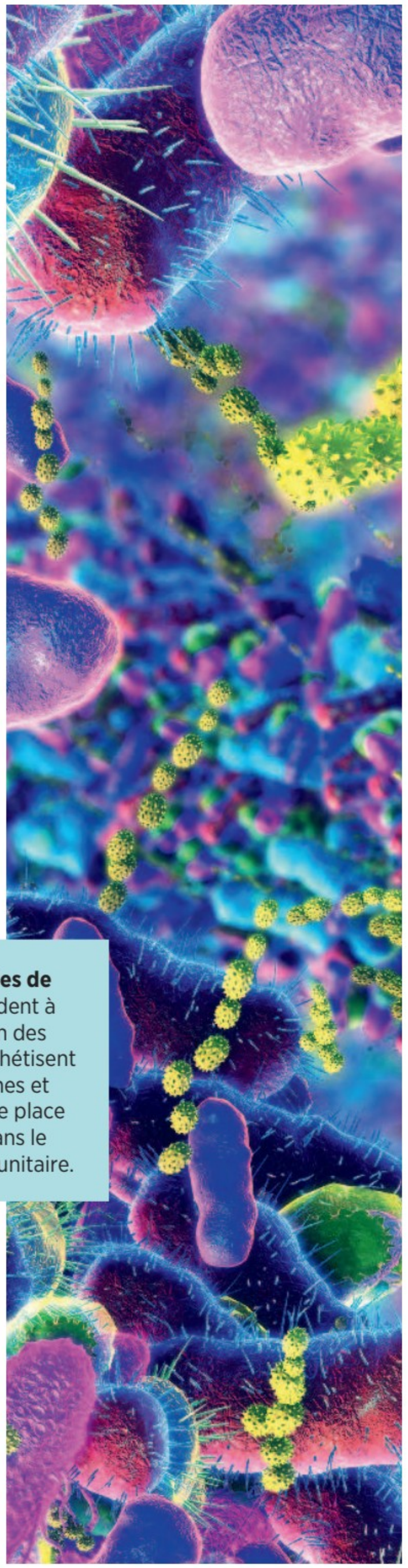
En tout, au moins cinq microbiotes (intestinal, respiratoire, cutané, génital et buccal) peuplent notre organisme dans un continuum cellulaire d'échanges et d'interactions constants. Si le dialogue entre organisme et microbiote est fécond et puissant, il fonctionne souvent dans les deux sens. Un stress chronique peut ainsi influer sur l'équilibre de notre microbiote et le bouleverser. Et *vice versa*. « *Des souris auxquelles nous transférons le microbiote de congénères stressées hériteront de leur stress* », explique Gérard Eberl (Institut Pasteur/Inserm).

Ainsi, même le cerveau se retrouve sous contrôle bactérien. Les chercheurs ont découvert récemment que nos neurones étaient capables de sentir des changements dans le microbiote *via* un récepteur présent à leur surface, qui réagit à des petites molécules échappées de la paroi des bactéries.

Dans certaines pathologies, lorsque le microbiote est déréglé, il diffuse des molécules néfastes pour ces récepteurs, entraînant l'organisme dans un cercle vicieux. Par exemple, une mauvaise alimentation, en perturbant le microbiote, peut entraîner un dérèglement des neurones qui conduira à une perte de contrôle de la prise alimentaire, enclenchant ou aggravant un problème d'obésité. Lorsque ce récepteur est défectueux, cela peut entraîner des failles dans la régulation de processus aussi essentiels que la faim ou la soif, mais être également un facteur de prédisposition à la bipolarité ou à la maladie de Parkinson.

Aujourd'hui, la manipulation du microbiote est un allié précieux pour comprendre plusieurs de ces maladies. Mais aussi les résoudre, comme dans le cas des immunothérapies anticancéreuses ou dans celui des maladies inflammatoires chroniques intestinales, pour lesquelles des essais cliniques sont en cours.

Cependant, tout reste à faire. Car notre microbiote contient également des virus, des champignons et autres protozoaires. La *terra incognita* n'a pas fini de dévoiler de nouveaux territoires. ■ **Hervé Ratel**



Les bactéries de l'intestin aident à la digestion des aliments, synthétisent des vitamines et occupent une place centrale dans le système immunitaire.

GETTY IMAGES

Crispr-Cas9 à la conquête du génome humain

La nouvelle technique d'édition génomique, couronnée d'un Nobel en 2020, a été adoptée par la communauté scientifique en un temps record.

Comme un symbole, le XXIe siècle s'est ouvert avec le premier séquençage complet du génome humain en 2001 — officiellement en 2003. L'aboutissement d'un siècle de recherche fondamentale ayant posé les fondations d'une science nouvelle : la génétique. Inédite, cette lecture intégrale des trois milliards de lettres (combinaisons des nucléotides A, C, G, T) composant un ADN humain permettait de dénombrer pour la première fois quelque 21 000 gènes. Le fruit d'un vaste programme de recherche international entamé en 1988, le Human Genome Project, qui aura, en quelque sorte, fait entrer notre siècle dans le vif du sujet de la génétique. Car une fois lu ce code source de l'humanité, inscrit dans le noyau de chaque cellule, il devenait permis de rêver à son décryptage pour comprendre comment il s'articule avec l'activité biologique d'un organisme, en particulier lorsque celui-ci est frappé de maladie. Et donc, pourquoi pas, le réécrire avec précision ?

Pour mémoire, les 23 paires de chromosomes présents dans chacune de nos cellules sont constituées d'ADN. Cet acide désoxyribonucléique est lui-même composé d'un enchaînement de molécules organiques, les nucléotides : adénine (A), cytosine (C), guanine (G), thymine (T). Un gène correspond à une séquence de nucléotides combinés pour « coder une protéine » ; autrement dit, un plan permettant à une cellule de fabriquer une protéine nécessaire au fonctionnement de l'organisme. Par exemple, le gène HBB situé sur le chromosome 11 code l'hémoglobine, protéine essentielle aux globules rouges pour transporter l'oxygène dans le sang. Lorsque ce gène est muté, la protéine produite n'est pas fonctionnelle et empêche donc le sang d'oxygéner les organes… C'est la drépanocytose. Soit la maladie génétique la plus répandue au monde : 300 000 naissances par an pour 6 à 9 millions de malades — entre 20 000 et 30 000 personnes en France. Pour la guérir, il suffirait d'intervenir sur quelques lettres du génome seulement. C'est bien ce qu'aura permis la découverte de ce quart de siècle en biologie : Crispr-Cas9 (prononcez « crispeur casse neuf »), en 2012. Le fameux couper/coller de la génétique, facile d'utilisation, peu coûteux, simplifie et libère la recherche comme peu de découvertes le font. Fait rare : il n'a fallu que huit ans au comité Nobel pour prendre acte de l'impact majeur de Crispr-Cas9 et attribuer le prix de chimie 2020 à ses codécouvreuses : la Française Emmanuelle Charpentier et l'Américaine Jennifer Doudna. *« La vitesse à laquelle la communauté scientifique s'est approprié la technologie pour l'améliorer, la modifier et en étendre ses applications est juste exceptionnelle »*, nous confirmait alors Alexis Verger, chargé de recherche CNRS en biologie structurale intégrative à l'université de Lille.

Cette biotechnologie permet de supprimer, ajouter ou remplacer un ou plusieurs gènes sur n'importe quel organisme

La modification d'embryons humains, annoncée en 2018 par le biologiste chinois He Jiankui avec la naissance de bébés OGM, a fait l'effet d'une bombe chez les scientifiques.

MARK SCHIEFELBEIN/AP/SIPA

La technologie en question, Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna la découvrent en étudiant le système immunitaire de micro-organismes. Nombre d'espèces bactériennes disposent, dans leur génome même, d'un système d'autocorrection de l'ADN ultra-précis, qui peut servir de biotechnologie pour supprimer, ajouter ou remplacer un ou plusieurs gènes sur n'importe quel autre organisme.

Un tollé mondial dans le milieu de la bioéthique

D'autres techniques d'édition génétique existaient avant et sont encore utilisées, comme les vecteurs viraux — un virus inoffensif équipé d'un gène-médicament à délivrer dans les cellules qu'il infecte. Mais le système Crispr est à la fois plus accessible financièrement, plus polyvalent et plus précis.

Au point d'emballer la machine. Dès avril 2015, l'équipe de Junjiu Huang à l'université Sun Yat-Sen (Chine) annonce la première modification du génome sur des embryons humains — non viables. L'annonce ébrèche le tabou d'une possible ingénierie génétique de l'humain. Car modifier des embryons, c'est transmettre cette modification à leur possible descendance. À l'époque, le neurobiologiste Hervé Chneiweiss, alors président du comité d'éthique de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), s'insurgeait dans nos colonnes : *« On ne joue pas avec des embryons humains [...] Cela n'apporte strictement rien à la connaissance du génome, sur le plan scientifique. C'est juste pour la prouesse technique.* » En l'occurrence, l'étude révéla que l'édition du gène HBB — celui de la drépanocytose, déjà — n'avait fonctionné que pour 28 embryons sur 71.

Mais deux ans plus tard, en 2017, l'université médicale de Canton (Chine) annonce les premières modifications sur des embryons, viables cette fois... et l'opération — toujours sur la drépanocytose — a bien mieux fonctionné ! Le débat qui s'était ouvert penche désormais vers l'autorisation d'éditer des embryons jusqu'à 7 à 14 jours, à des fins de recherche uniquement. Ne serait-ce que pour apprendre à maîtriser l'outil. D'autant qu'on lui découvre une fâcheuse tendance à introduire dans le génome des modifications non ciblées, dites « off target » (« hors cible » en français).

Cela n'empêchera pas He Jiankui, 34 ans, de franchir la ligne rouge de tous les comités d'éthique du monde, y compris en Chine. Le 19 novembre 2018, à la veille de l'ouverture du Sommet international de l'édition du génome humain à Hong Kong, le jeune professeur de l'université des sciences et des technologies du Sud à Shenzhen (Chine) annonce la naissance un mois plus tôt de jumelles issues d'embryons génétiquement modifiés. Et provoque un tollé mondial, en particulier dans le monde de la bioéthique. En Chine, ses travaux sont stoppés, He Jiankui disparaît même quelques semaines... avant de réapparaître en résidence surveillée.

Première thérapie cellulaire contre la drépanocytose

Les enquêtes menées par l'université et le gouvernement chinois révèlent une troisième naissance, Amy, en 2019. En décembre, He Jiankui est condamné à trois ans de prison et 400 000 euros d'amende. Quant aux jumelles génétiquement modifiées, anonymisées sous les prénoms de Lulu et Nana, elles sont le fruit d'un couple de volontaires dont le père est séropositif au VIH. Après une fécondation *in vitro*, He Jiankui a utilisé Crispr-Cas9 pour modifier le gène CCR5 qui code une protéine utilisée par le VIH pour pénétrer les cellules. Cette mutation CCR5-delta32 est connue pour conférer une immunité forte au virus du sida. C'est celle-ci qu'auraient reçue les petites filles âgées aujourd'hui de 6 ans et demi. Mais impossible de recouper l'information. Il faut croire He Jiankui sur parole, qui n'a jamais publié les données

de son expérience. *« Les fillettes vivent une vie parfaitement normale, paisible et heureuse »*, assurait-il en 2023 dans *Les Échos*. Et comme l'existence de Lulu, Nana et Amy est avérée par les autorités chinoises, il faut se rendre à l'évidence : Crispr-Cas9 a fait basculer le XXIe siècle dans une nouvelle ère de la génétique en offrant *« le redoutable pouvoir de contrôler l'évolution »*, selon l'expression de Jennifer Doudna.

De façon plus prosaïque, à la paillasse, dans des cadres éthiques respectés, les progrès fulgurants des techniques génétiques laissent entrevoir de meilleurs auspices. Comme la première thérapie cellulaire curative contre la drépanocytose, homologuée en 2023 sous le nom de Casgevy. Le traitement consiste à prélever des cellules souches sanguines au patient pour les éditer génétiquement de sorte qu'elles (et leur très longue descendance) produisent plus d'hémoglobine, la protéine manquante. Puis de réinjecter les cellules modifiées. Coût : deux millions d'euros. Il s'agit du seul traitement utilisant Crispr autorisé à ce jour.

Trouver le bon gène à corriger dans une machinerie complexe

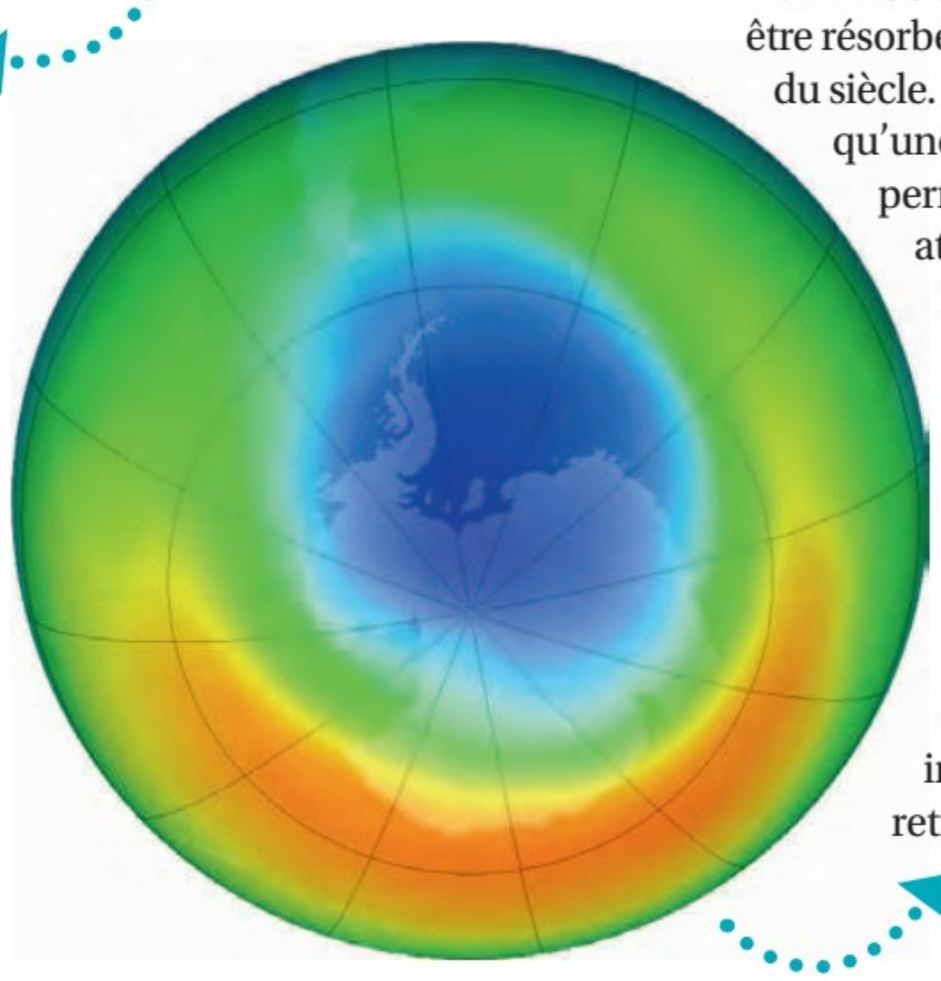
Les connaissances acquises en accéléré sur le génie génétique depuis 2012 ont aussi révélé l'incroyable complexité de la machinerie moléculaire des cellules. Les maladies monogéniques, dues à un seul gène muté, sont plutôt l'exception, comme la mucoviscidose et son gène CFTR, en ligne de mire de la recherche. Mais lorsqu'une maladie implique des dizaines ou centaines de gènes, encore faut-il savoir quoi corriger dans le code. Alors que le séquençage complet d'un génome humain se fait désormais en 48 heures pour 1000 euros, le décryptage fin reste délicat. Même si l'intelligence artificielle a déjà accéléré les choses.

En attendant, Crispr et les techniques encore plus perfectionnées développées à sa suite permettent aux chercheurs de développer à la demande des modèles cellulaires ou animaux pour l'étude des cancers, des maladies cardiaques, d'Alzheimer ou Parkinson, les tests de molécules, etc. Le génome humain n'est plus la boîte noire de l'an 2000, mais un livre ouvert dont il reste à saisir tous les tenants et les aboutissants, pour que chaque réécriture envisagée soit pertinente et faite en sécurité. ■ **Hugo Jalinière**

K. BARBER/NASA/PLANET PIX/ZUMA PRESS WIRE/REA; NASA

Le plus gros échantillon d'astéroïde

RECORD En 2023, après un voyage de sept ans dans l'espace, la sonde américaine Osiris-Rex largue sur Terre sa cargaison : 121 g de roches et de fines poussières prélevées trois ans plus tôt sur l'astéroïde Bénou. C'est, de loin, la plus grande quantité de matière astéroïdale jamais collectée *(photo)*. En 2020, le Japon avait rapporté 5,4 g de Ryugu et en 2010 moins d'un milligramme d'Itokawa. L'analyse de ces échantillons alimentera des recherches pendant de nombreuses années. Elles permettront, en particulier, de mieux comprendre la formation du Système solaire et comment notre planète est devenue habitable. **F. D.**



Le trou dans la couche d'ozone se résorbe

SUCCÈS C'est en l'an 2000 que le trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique a atteint sa taille record, avec 29,9 millions de km² *(ci-contre en bleu en 2019)*. Depuis, il diminue régulièrement et devrait être résorbé dans la seconde moitié du siècle. Ce succès est la preuve qu'une réponse mondiale peut permettre de résoudre une atteinte globale à l'environnement : le protocole de Montréal (1987) a en effet banni l'usage de molécules chlorées responsables de la destruction. Selon la dernière estimation de l'ONU publiée en 2023, 99 % des substances interdites ont bien été retirées du marché. **L. C.**

GULSHAN KHAN / AFP

Squelette d'« Homo naledi » reconstitué à partir de multiples ossements mis au jour dans une grotte à Maropeng, près de Johannesburg (Afrique du Sud).

Des cousins inattendus surgissent du passé

Denisova, H. naledi, H. floresiensis, H. luzonensis... Depuis vingt-cinq ans, les découvertes d'espèces cousines d'Homo sapiens se sont multipliées.

En 2003, la découverte de Flora, une cousine lilliputienne du genre *Homo,* sur l'île indonésienne de Flores, provoque un choc similaire à celui qui secoua en 1856 les sociétés savantes et le public après la trouvaille de l'homme de Neandertal, en Allemagne. Avec son crâne oblong, sa barre au front, sa silhouette trapue, celui-ci est d'abord décrit comme un cosaque dégénéré, et non une nouvelle espèce. Flora, avec sa tête à peine plus grosse qu'un pamplemousse, sa taille d'un mètre environ, ses longs bras qui évoquent ceux d'un australopithèque, suscite un même rejet : des scientifiques y voient un *Homo sapiens* crétin nain (au sens médical du terme) ou un trisomique. La controverse dure dix ans, avant que la majorité des chercheurs n'admette qu'il s'agit bien d'une nouvelle espèce, *Homo floresiensis*, ayant vécu il y a 100 000 à 60 000 ans, descendant de l'*homo erectus* africain et ayant subi un nanisme insulaire, comme d'autres mammifères, tels les stégodons (des ancêtres éléphants), sur d'autres îles.

En 2010, autre déflagration : une nouvelle espèce, Denisova, surgit, baptisée à partir de l'ADN d'une phalange de fillette, découverte dans une grotte de Sibérie du même nom. Entretemps, la paléogénomique a complètement rebattu les cartes de la discipline en disséquant les génomes des espèces *H. sapiens* et *H. neanderthalensis*, montrant qu'il y avait eu mélange entre les deux premiers, et cette fois que l'ADN de Denisova était encore totalement différent. Les fouilles montreront que l'espèce dénisovienne a vécu il y a entre 400 000 ans et 30 000 ans environ, s'est attaquée aux contreforts de l'Himalaya et a légué largement ses gènes aux Tibétains, mais également aux Chinois et aux habitants de Papouasie-Nouvelle-Guinée.

En 2013, surprise : le continent africain recelait aussi des cousins inattendus, toujours contemporains d'*Homo sapiens*, même si on ignore encore s'il les a croisés : les minuscules *Homo naledi*, ayant vécu de -335 000 à -236 000 ans. L'accumulation de leurs corps dans une grotte sud-africaine soulève la question de savoir s'ils ont été engloutis par une catastrophe naturelle ou s'ils ont été intentionnellement ensevelis.

L'année 2019 enrichit le cercle d'un nouveau petit humain contemporain d'*H. sapiens* : *H. luzonensis*, aux Philippines. Dents extraordinaires, phalange de pied courbe, vivant il y a 67 000 ans à 50 000 ans. Il a été découvert par une équipée dirigée par le Français Florent Détroit, du musée de l'Homme à Paris. ■

Rachel Fléaux

NATALIA VARLEI/ ALAMY / PHOTO12

Les médicaments analogues du GLP-1 (ici une injection d'Ozempic) ont pour effet une secrétion accrue d'insuline et une baisse de la glycémie.

GLP-1, l'hormone à tout faire

Indiqués dans le traitement du diabète puis de l'obésité, les médicaments imitant cette hormone montrent des effets thérapeutiques prometteurs dans les maladies cardio-vasculaires, neurodégénératives, les addictions...

Elle a fait l'effet d'un boulet de canon dans le monde de la recherche et fut qualifiée en 2023 de *« percée de l'année »* par la revue *Science*. Produite dans l'intestin après un repas, l'hormone incrétine GLP-1 stimule la sécrétion d'insuline par le pancréas. Ce rôle clé dans la régulation de la glycémie s'accompagne d'un ralentissement de la vidange gastrique, ce qui prolonge la sensation de satiété. Pour amplifier l'action de cette hormone, plusieurs molécules ont été mises au point, comme le liraglutide ou le sémaglutide. Avec des résultats spectaculaires dans la lutte contre le diabète de type 2 et l'obésité (une perte de poids jusqu'à 15 % du poids global en quinze mois), les nouveaux médicaments GLP-1 ont d'abord été commercialisés aux États-Unis avant d'être disponibles en France pour ces deux pathologies depuis, respectivement, 2019 et 2024.

En parallèle, GLP-1 ne cesse d'attirer l'attention de la recherche dans de nombreux autres domaines de la santé. Les médicaments imitant cette hormone ont montré un effet bénéfique pour le cœur, réduisant les risques d'infarctus du myocarde, d'accident vasculaire cérébral et de décès d'origine cardio-vasculaire de façon plus générale. Ils suscitent aussi l'espoir dans les maladies neurodégénératives comme Alzheimer ou Parkinson, grâce à leur effet positif sur l'inflammation du tissu cérébral et sur la métabolisation du glucose.

Des effets secondaires à surveiller

Et la liste continue : dépression, anxiété, addiction à l'opium, aux psychostimulants, à l'alcool... puisqu'on trouve en effet des récepteurs du GLP-1 dans le cortex préfrontal, l'hippocampe et l'amygdale, des aires cérébrales impliquées dans la fonction cognitive et le contrôle émotionnel.

Même les personnes atteintes du VIH pourraient en profiter. Environ 30 à 40 % d'entre elles sont affectées par une dysfonction métabolique : la maladie du foie gras ou stéatose hépatique, qui se caractérise par une accumulation de graisse dans le foie. Une pathologie que les analogues du GLP-1 parviennent à éliminer totalement dans près d'un tiers des cas.

Plusieurs effets secondaires restent toutefois à surveiller, parmi lesquels la gastroparésie. Ce ralentissement de la vidange gastrique quadruple le risque de vomissements et triple celui de nausées. Le risque de diarrhées est lui, doublé. La menace la plus sévère est la pancréatite, une inflammation du pancréas parfois mortelle. Quant à l'occlusion intestinale, un blocage du transit pouvant aller jusqu'au décès, elle est multipliée par quatre. ■

Coralie Lemke

LES NOUVEAUX MOTS DE NOTRE QUOTIDIEN

Voici une sélection de mots apparus ou popularisés au cours de ce premier quart de siècle. Sauriez-vous tous les définir ?

Blockchain (ou chaîne de blocs)

Technologie de stockage et de transmission d'informations, sécurisée, transparente et sans intermédiaire. Chaque transaction est enregistrée dans un bloc, ajouté à une chaîne partagée et infalsifiable.

Covid (ou Covid-19)

Maladie infectieuse causée par le coronavirus Sras-CoV-2, apparue fin 2019 en Chine. Elle se transmet par les gouttelettes respiratoires et provoque des symptômes variables, allant du simple rhume à des formes graves, parfois mortelles.

Cryptomonnaie

Monnaie numérique décentralisée, reposant sur la technologie blockchain. Elle permet d'échanger de la valeur entre internautes sans passer par une banque centrale, comme avec le Bitcoin, lancé en 2009.

Deepfake (ou hypertrucage)

Contenu audio, vidéo ou image généré par IA, parfois impossible à distinguer d'un document authentique.

Désextinction

Ensemble des techniques scientifiques visant à ramener à la vie des espèces disparues, comme le mammouth laineux ou le dodo, à partir de restes fossiles ou par modification génétique d'espèces proches.

Écoanxiété

Mal-être psychologique lié à la conscience des bouleversements environnementaux (changement climatique, effondrement de la biodiversité, catastrophes naturelles). Il se manifeste par de l'inquiétude, de la tristesse et un sentiment d'impuissance.

Hominine

Membre de la lignée humaine comprenant le genre *Homo* et ses ancêtres fossiles proches (Toumaï, Orrorin, australopithèques, etc.). Le terme se distingue d'hominidé, qui englobe aussi les grands singes actuels.

HPI (haut potentiel intellectuel)

Personne dont le quotient intellectuel (QI) est supérieur à 130, caractérisée par un fonctionnement cognitif atypique, souvent repérable dès l'enfance. Le terme remplace aujourd'hui celui de « surdoué ».

Métavers

Univers numérique immersif et persistant (qui continue d'évoluer même quand on n'y est pas) où l'on peut interagir avec d'autres personnes, des objets ou des environnements en 3D, souvent *via* un avatar. On y accède généralement par un casque de réalité virtuelle.

Microbiome

Ensemble des micro-organismes — bactéries, virus, champignons — et de leurs gènes présents dans un environnement donné, tel l'intestin, la peau, mais aussi les sols ou les océans. Chaque microbiome forme un écosystème étroitement lié à la santé de son hôte ou de son milieu.

Mème

Contenu humoristique (image, vidéo, phrase) diffusé et transformé rapidement sur Internet. Le terme a été introduit en 1976 par le biologiste Richard Dawkins pour désigner une idée qui se propage comme un gène.

Nomophobie

Peur excessive d'être séparé de son téléphone mobile. Ce néologisme, formé à partir de l'anglais *no mobile-phone phobia*, est apparu au Royaume-Uni en 2008.

Plasticroûte

Forme de pollution plastique découverte en 2016, correspondant à une croûte de plastique fondue et incrustée dans les roches des littoraux, sous l'effet de l'eau salée et du soleil.

Post-vérité

« Circonstances dans lesquelles les faits objectifs ont moins d'influence pour former l'opinion publique que les appels à l'émotion et aux croyances personnelles », selon le dictionnaire Oxford qui l'a désigné mot de l'année en 2016.

Scroller

Action de faire défiler du contenu sur un écran à l'aide du doigt ou de la molette d'une souris. Ce geste, central dans la navigation numérique, est parfois associé à des comportements addictifs.

Solastalgie

Souffrance psychique provoquée par la dégradation de l'environnement local, notamment en lien avec le changement climatique. Elle s'apparente à une nostalgie du lieu que l'on habite encore, mais que l'on voit se détériorer.

Intelligence artificielle (IA)

Ensemble de techniques qui permettent à des machines d'imiter certaines fonctions humaines comme le raisonnement, l'apprentissage, la reconnaissance d'images ou le langage. Si le concept est ancien — il apparaît dès les années 1950 sous la plume du mathématicien Alan Turing, puis lors de la conférence fondatrice de Dartmouth en 1956 —, ce n'est qu'au XXIe siècle que l'IA a connu un véritable essor grâce à la montée en puissance des ordinateurs, des données et des algorithmes. Au début des années 2020, le grand public découvre l'IA générative, capable de produire du texte, des images ou du son à partir d'une simple requête (*prompt*). Ces systèmes, comme ChatGPT, reposent sur des modèles d'apprentissage automatique qui ont été entraînés sur des milliards de mots, de phrases, de conversations ou de pages Web.

Anthropocène

Nouvelle époque géologique marquée par l'impact massif et durable des activités humaines sur la planète (pollution, réchauffement climatique, effondrement de la biodiversité, etc.). Popularisée en 2000 par le chimiste Paul Josef Crutzen, elle ferait suite à l'holocène, période stable ayant suivi la dernière glaciation, et introduirait l'idée que l'être humain est devenu une force géologique à part entière. Sa reconnaissance par les géologues passe par la définition d'un marqueur stratigraphique clair, appelé « clou d'or » : une trace physique inscrite dans les couches de sédiments terrestres qui à ce jour ne fait pas encore consensus.

2050 | 2025

Des organes de synthèse à la demande

GREFFES Face à la pénurie, les organes de synthèse font rêver. *« Nous arrivons bien à mimer certaines structures fonctionnelles d'un organe, comme une partie de l'intestin ou du cerveau »*, explique Vincent Flacher, directeur de recherche au CNRS. Des organoïdes d'îlots de Langerhans, qui produisent l'insuline dans le pancréas, sont déjà en développement. La synthèse d'un organe complet avec sa vascularisation et son système immunitaire est encore hors de portée. Mais la bio-impression à partir de cellules souches *(photo)* promet des applications thérapeutiques, comme pour la greffe de peau. **C. G.**

Des organoïdes pour remplacer les animaux de laboratoire

EXPÉRIMENTATIONS Allons-nous vers l'utilisation d'organoïdes comme alternative à l'expérimentation animale ? Ces versions miniatures et simplifiées d'organes réduisent déjà le nombre d'animaux utilisés *(en photo, culture de tissus cérébraux humains)*. Il est même possible de combiner plusieurs organoïdes grâce à la microfluidique, qui permet de faire circuler entre eux de petites quantités de réactif. À l'avenir, la reconstitution d'un organisme entier sur une puce semble envisageable. **A.-S. T.**

Le futur de l'édition génétique

OGM Dès sa sortie de prison en 2022, He Jiankui, à l'origine de la naissance des premiers bébés OGM (*lire p. 48*), a retrouvé un poste à l'université de technologie Wuchang à Wuhan (Chine). S'il reconnaît s'être trop précipité dans sa quête de gloire, il n'en démord pas : l'avenir est au génie génétique, en particulier au stade embryonnaire, pour éradiquer le cancer, Alzheimer et le sida. Au-delà de cette approche controversée, il est certain que l'édition génétique aboutira dans les 25 prochaines années à de nouveaux traitements. **H. J.**

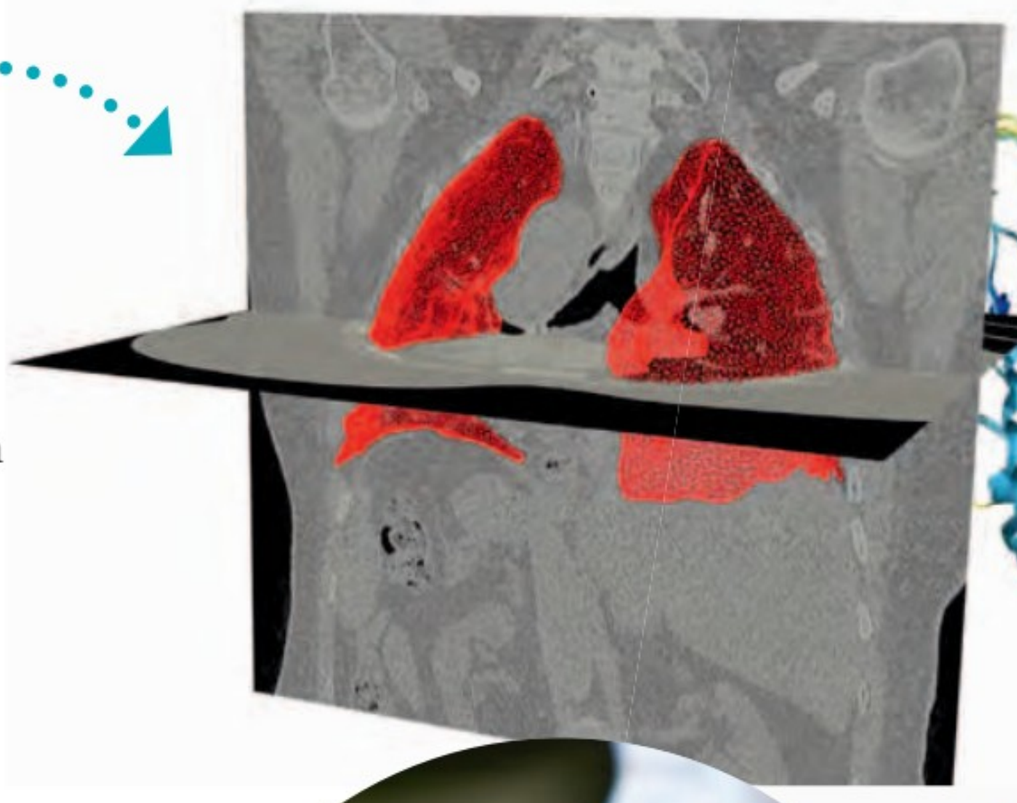
ELISABETH RULL / DIVERGENCE; PATRICIA KÜHFUSS/LAIF-REA

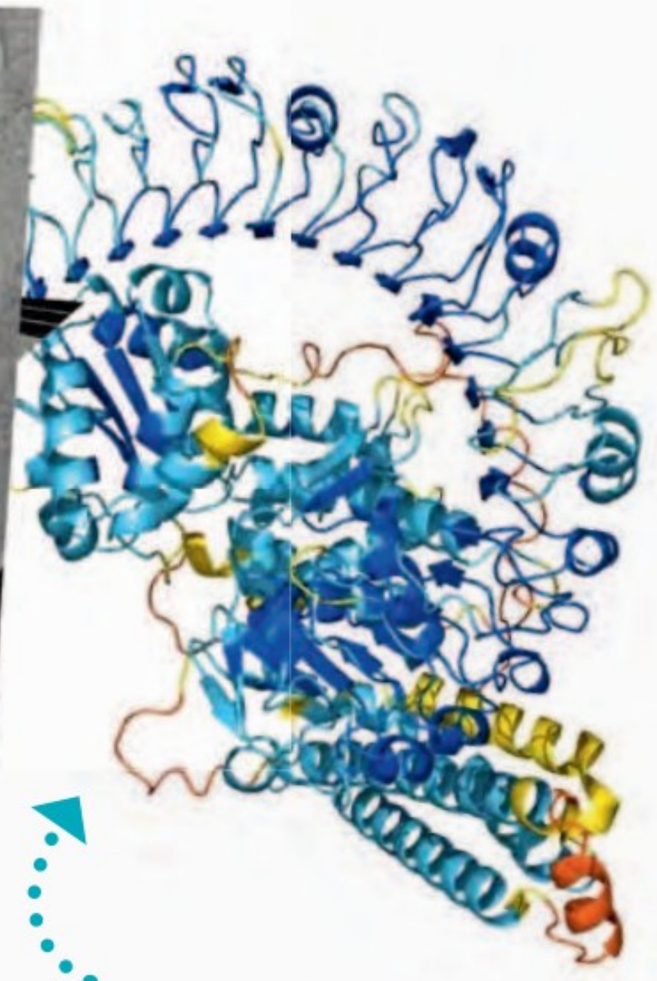
Bio-impression et thérapies cellulaires

RÉGÉNÉRATION Les bases sont posées pour voir aboutir dans les prochaines années des greffes de tissus bio-imprimés à l'aide d'encres cellulaires pouvant reproduire la peau pour les grands brûlés, le cartilage ou les os pour les blessures graves. Ou encore injecter des cellules souches modifiées, comme ce fut le cas en avril (*lire* S. et A. *n° 940*) pour rétablir la production de dopamine dans le cerveau de patients atteints de la maladie de Parkinson. Difficile de prédire à quoi elles ressembleront en 2050, mais les thérapies régénératrices ont le vent en poupe. **H. J.**

Un avatar numérique pour prédire sa santé

MODÉLISATION La médecine deviendra-t-elle entièrement numérique ? La multiplication de dispositifs de collecte de données de santé en temps réel (montres, bagues, etc.) pourrait alimenter un avatar numérique développé pour prédire la santé de chacun. Tout changement anormal d'un marqueur biologique serait analysé et le cas échéant interprété pour déterminer un traitement personnalisé. Si une chirurgie est nécessaire, les informations seraient transmises à un robot chirurgical capable d'opérer sans intervention humaine nécessaire. Et le médecin ? Il lui resterait à valider les décisions prises par l'IA. **N. G. C.**





Alphafold bouleversera la médecine

DÉFI On peine encore à mesurer l'impact de la déflagration théorique qui s'est abattue sur le monde de la biochimie en 2021. En réussissant à modéliser la forme tridimensionnelle *(photo)* prise par les 200 millions de protéines qui structurent le monde du vivant, l'algorithme Alphafold a mis fin à l'un des défis les plus tenaces qui agitaient la biochimie depuis un demi-siècle. Désormais, la balle est dans le camp des industries pharmaceutiques pour s'emparer de ces nouvelles données afin d'en tirer de nouveaux médicaments et des thérapies inédites. **H. R.**

Du sang de culture universel

TRANSFUSION *« En France il n'y a pas de pénurie de sang mais des tensions, surtout pour les groupes sanguins plus rares comme ceux des personnes d'origine africaine »*, expose France Pirenne, professeure d'hématologie transfusion à l'université Paris-Est Créteil. Si la perspective de produire du sang de culture d'ici à 2050 n'est pas de la science-fiction, le principal frein est le rendement, qui n'excède pas les 15 millilitres par culture. Une autre stratégie, publiée récemment par des chercheurs suédois, consiste à convertir, avec un rendement élevé, du sang de groupe A en groupe O — celui des donneurs universels. **C. G.**

CÉCILE PATTE, GOOGLE DEEPMIND; BSIP

Vers une carte complète des fonds marins

RECENSEMENT Amorcé en 2017, le projet Seabed 2030 vise à cartographier l'intégralité des fonds marins d'ici à 2030 en compilant toutes les données bathymétriques disponibles. Depuis son lancement, l'initiative internationale a enregistré une augmentation de 4,34 millions de km² de nouvelles données, soit 26,1 % du plancher océanique. Dans les prochaines années, l'exploration des abysses bénéficiera par ailleurs de technologies innovantes, tels les robots autonomes pilotés par intelligence artificielle ou les réseaux de capteurs câblés et mobiles, qui permettront de mieux connaître une biodiversité dont plus de 90 % des espèces seraient encore inconnues. **S. R.**

Les promesses du microbiome océanique

ABYSSES L'immense biodiversité microbienne des océans reste largement inconnue. Grâce au séquençage de l'ADN environnemental, on s'attend à découvrir des milliers d'espèces dans les abysses, les sources hydrothermales ou les zones anoxiques. Une mine d'or pour les biotechnologies, qu'il s'agisse de la mise au point de nouveaux médicaments, de bioremédiation avec des microbes capables de dégrader plastiques ou métaux lourds, ou de nouvelles voies de métabolisation du CO_2, inspiratrices de technologies de capture du carbone. **S. R.**

La météo ultralocale

ANTICIPATION Capteurs, radars, imagerie satellitaire : grâce à ces outils, la prévision météo s'applique à des territoires de plus en plus restreints. Cette précision grandissante va permettre d'anticiper des événements violents et très localisés comme les orages, qui devraient arriver plus souvent dans un climat plus chaud. Mais c'est en agriculture que les attentes sont les plus fortes. La « météo à la parcelle » commence à apporter la preuve qu'elle peut permettre aux agriculteurs d'économiser l'eau et de mieux gérer leurs cultures (*lire aussi p. 90*). **L. C.**

Des plantes plus résistantes grâce à l'ADN

ADAPTATION Comment enrayer la pénurie alimentaire mondiale ? La recherche espère trouver la réponse en perçant le secret de l'ADN des plantes anciennes, aujourd'hui disparues. En suivant l'évolution des espèces grâce aux traces génétiques laissées dans l'eau ou le sol, il serait possible de repérer les traits qui rendaient les cultures plus résistantes et plus abondantes. Puis de les reproduire sur les céréales, les fruits et les légumes d'aujourd'hui, dont le rendement est plus faible. **C. L.**

CHRISTOPH GERIGK / BIOSPHOTO ; DENIS CHARLET / AFP ; JULIEN FAURE/LEEXTRA - OPALE

La nouvelle génération des IA hybrides

NUMÉRIQUE C'est l'un des buts de la recherche en IA. Au lieu d'essayer d'améliorer l'apprentissage à partir de données (de type *deep learning*), il s'agit de combiner différentes méthodes, y compris celles qui avaient été un peu délaissées comme l'IA symbolique, à base de règles. Le résultat est une hybridation consistant à retenir le meilleur des approches statistiques et logiques, les faiblesses des unes étant compensées par les forces des autres. **A. D.**

La révolution des supraconducteurs

ÉNERGIE Imaginez un monde où des dispositifs stockeraient l'énergie photovoltaïque de façon perpétuelle et où l'autonomie de nos appareils électriques serait prodigieuse. Ces applications et bien d'autres pourraient devenir une réalité grâce aux matériaux supraconducteurs, qui propagent le courant sans perte d'énergie. Ils ne fonctionnent pour le moment qu'à des températures ultrafroides, limitant les débouchés aux IRM des hôpitaux notamment. Mais les physiciens entendent mettre au point des supraconducteurs à température ambiante — peut-être sous la forme d'un solide enrichi en hydrogène, comme les recherches actuelles le suggèrent. **F. D.**

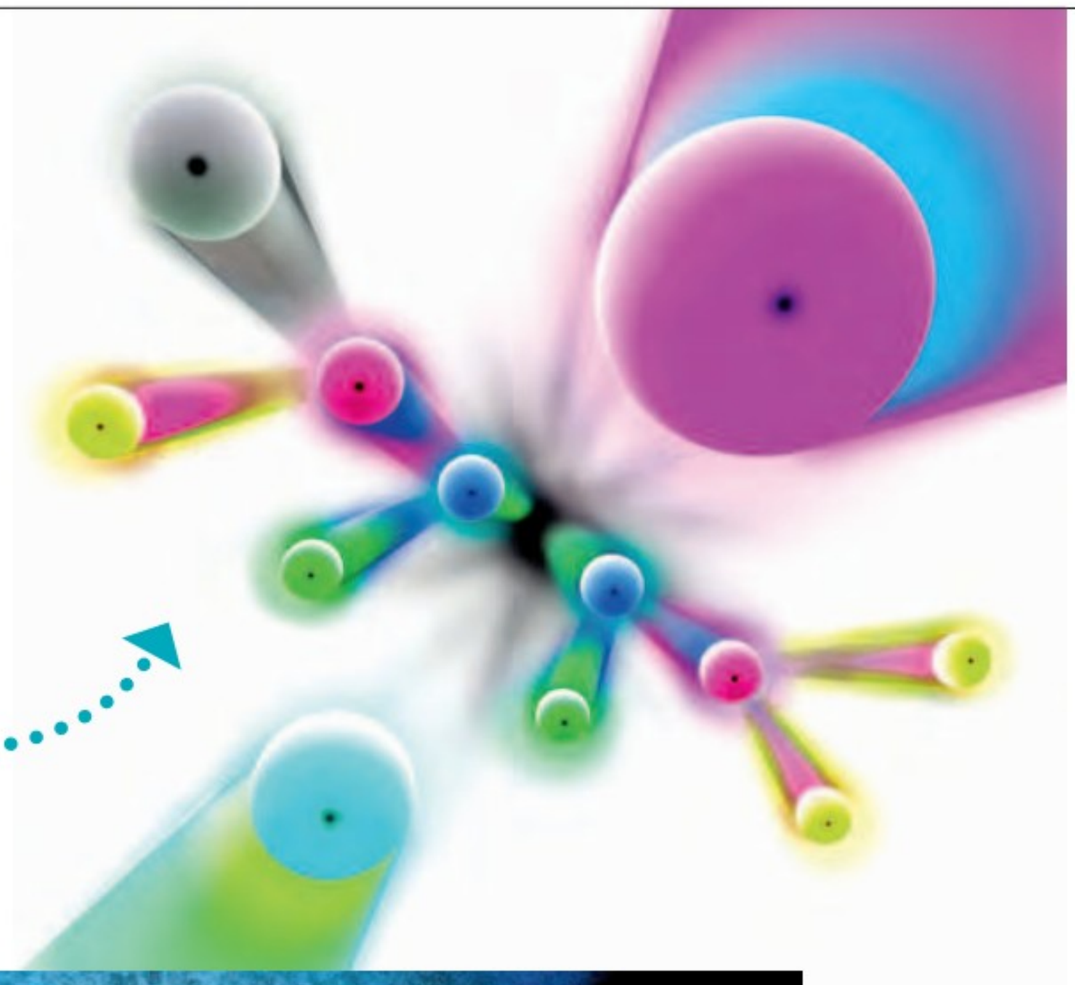
L'avènement de la batterie « tout solide »

MOBILITÉ La batterie solide pourrait révolutionner la voiture électrique : plus sûre, plus compacte, plus rapide à recharger, elle promet jusqu'à 1200 km d'autonomie. Mais cette technologie, qui repose sur un électrolyte solide et une anode tout en lithium, reste en développement. Les premières voitures tests sont attendues d'ici à 2029, et une fabrication à grande échelle ne débutera pas avant 2032. Le défi : réussir à produire ces batteries complexes de façon fiable, à un coût abordable. **F. N.**

AP/ SIPA; SPL/ SUCRÉ SALÉ; J. NEUDECKER/DPA/ SIPA

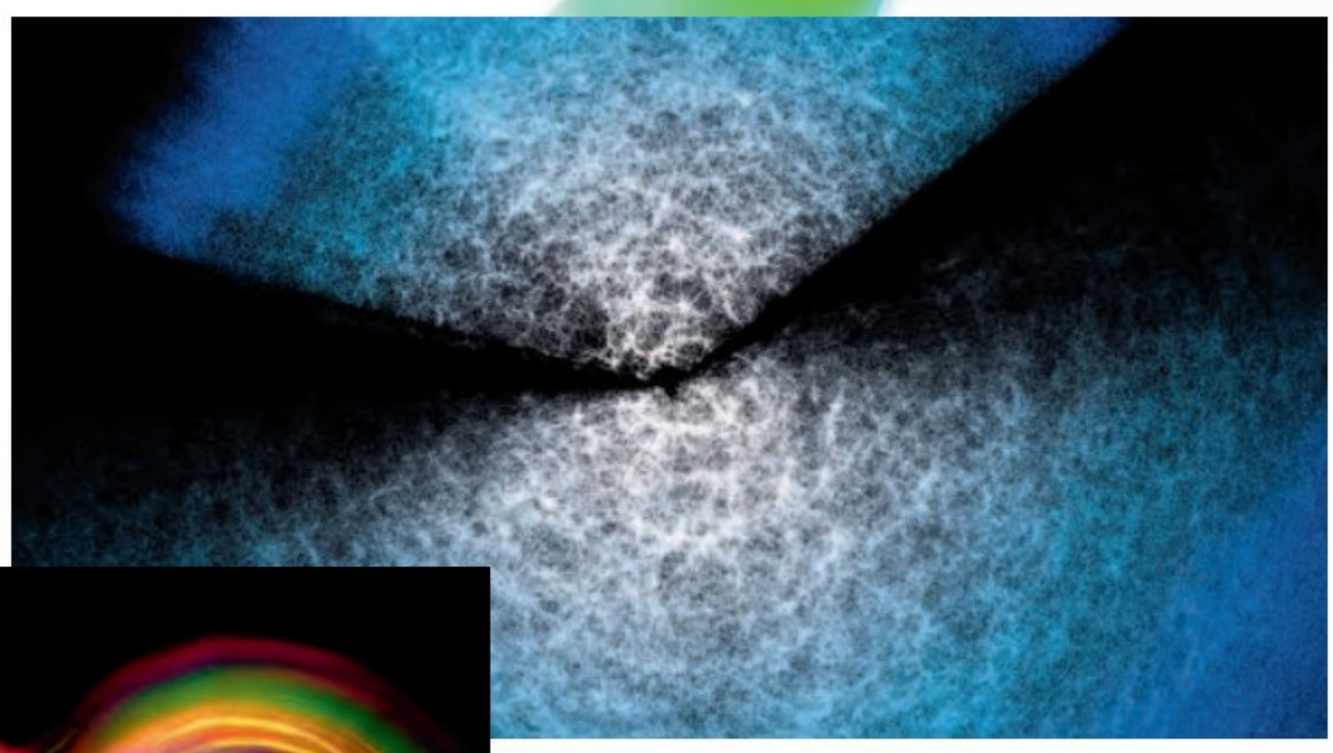
Recherche particules supersymétriques (désespérément)

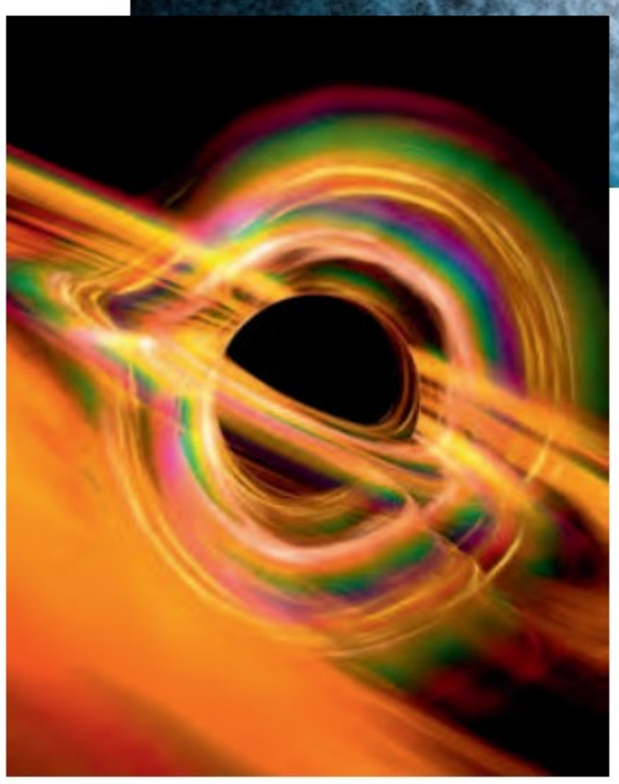
DÉTECTION Et si chaque particule connue avait une sœur cachée ? C'est l'idée de la supersymétrie, qui permettrait d'achever le modèle standard de la physique des particules en comblant certaines de ses lacunes, comme l'origine de la matière noire ou l'unification des forces fondamentales. Rien que ça ! Mais ces superparticules échappent encore aux détecteurs, malgré des années de recherche au LHC, le plus puissant des accélérateurs de particules. La théorie reste séduisante, mais l'absence de preuve commence sérieusement à « peser »… **F. N.**



Unifier les forces de la nature

THÉORIE La gravitation, l'électromagnétisme et les interactions nucléaires faible et forte sont les quatre forces fondamentales qui régissent l'Univers. L'un des grands objectifs de la physique théorique est de les unifier, comme elles devaient l'être juste après le Big Bang. Cela a été fait dans les années 1970 pour l'électromagnétisme et l'interaction faible, réunies dans la théorie électrofaible, démontrée expérimentalement. L'unification avec l'interaction forte reste théorique, sans preuve expérimentale. Quant à la gravitation, on cherche encore la bonne théorie… **F. N.**





Sur la piste des trous noirs intermédiaires et primordiaux

COSMOS Ni stellaires ni supermassifs, les trous noirs de masse intermédiaire — 100 à 100 000 masses solaires — (*vue d'artiste)* pourraient expliquer la formation des trous noirs géants par fusions successives. Mais ils restent introuvables. Quant aux trous noirs primordiaux, ils auraient pu naître quelques fractions de seconde après le Big Bang, dans des régions où la densité d'énergie dépassait un seuil critique. Éventuellement très légers et nombreux, ils représentent l'un des candidats envisagés pour constituer la matière noire. **F. N.**

L'énergie et la matière noire élucidées

UNIVERS Elles représentent 95 % du contenu de l'Univers. Mais leur nature reste inconnue, alors que leur rôle est essentiel : la matière noire structure les galaxies par sa masse, et l'énergie noire accélère l'expansion de l'Univers. Particules exotiques, champs inconnus ou gravité modifiée : les pistes ne manquent pas. Un effort unique dans l'histoire de l'astronomie mobilise de puissants instruments — Euclid, Desi — pour trouver la bonne. Avec un espoir, côté énergie noire, que les récents résultats de Desi (*photo*) lèvent un peu le voile sur ce mystère. **F. N.**

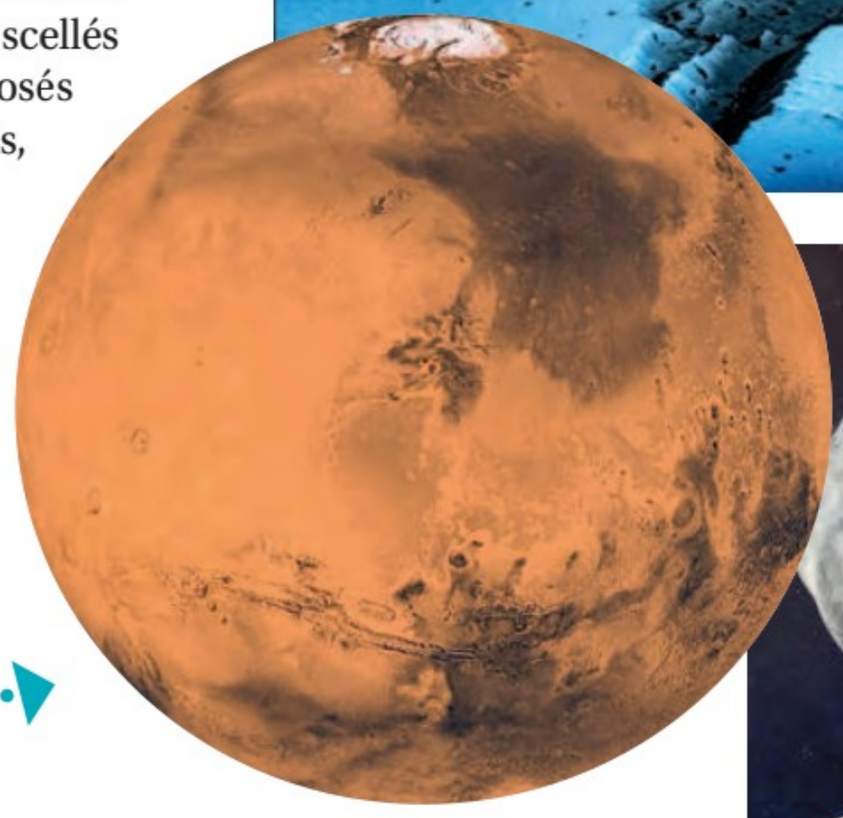
SPL/ SUCRÉ SALÉ; DESI; SPL/ SUCRÉ SALÉ

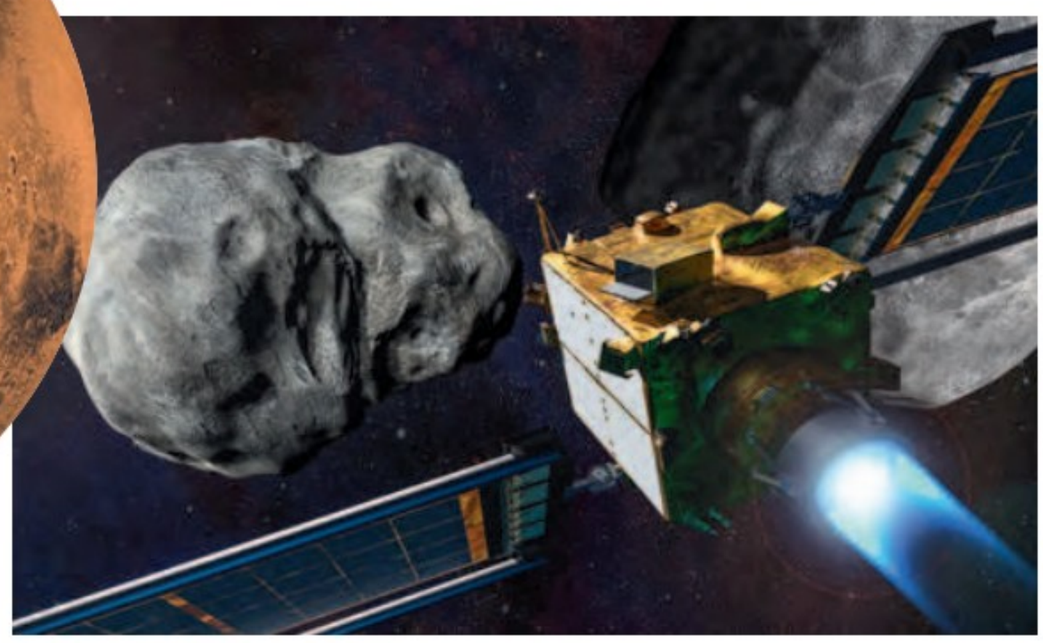
De la vie extraterrestre sur Encelade

EXOBIOLOGIE Vers la fin des années 2030, la mission de la Nasa Enceladus Orbilander pourrait s'envoler vers Encelade, lune de Saturne (*photo*). Depuis que la sonde Cassini (qui l'a étudiée jusqu'en 2017) a découvert qu'elle dissimulait sous sa croûte glacée un océan global d'eau liquide contenant lui-même une variété de sels et de composés organiques, elle est devenue une cible prioritaire en exobiologie. Orbilander devrait atterrir ainsi sur la surface d'Encelade et rechercher de possibles biosignatures, tels que des acides aminés, des lipides ou des morphologies ressemblant à celles des cellules. **F. D.**

Les premiers échantillons martiens

GRAAL La décennie 2030-2040 devrait connaître le premier retour d'échantillons martiens, qui promettent de transformer notre compréhension de Mars (*photo*), de la Terre, voire de l'origine de la vie. Si la politique américaine n'y met pas un coup d'arrêt, le projet le plus avancé est celui mené par la Nasa en collaboration avec l'ESA (Agence spatiale européenne). Depuis 2021, le rover Perseverance a déjà collecté plusieurs échantillons stockés dans des tubes scellés à bord du rover ou déposés à la surface. Les Chinois, avec la mission Tianwen-3, pourraient néanmoins être les premiers à ramener ce graal de l'exploration spatiale. **S. R.**





Dévier un astéroïde pour protéger la Terre

CRASH Comment l'humanité pourrait-elle réagir si elle découvrait qu'un astéroïde « tueur » se dirige vers notre planète ? À partir de décembre 2026, l'orbiteur européen Hera livrera à cet égard des informations essentielles. Il commencera une étude détaillée de l'astéroïde Dimorphos percuté et dévié en 2022 par l'impacteur Dart de la Nasa (*photo*). Hera déterminera notamment la taille du cratère d'impact ainsi que la masse, la composition et la structure interne du corps rocheux. Des données indispensables pour comprendre comment Dimorphos a été dévié par le choc. Et comment les extrapoler, plus tard, à d'autres astéroïdes qui poseraient un véritable danger. **F. D.**

SPL/ SUCRÉ SALÉ; NASA

Bientôt le retour du dodo ?

DÉSEXTINCTION La société américaine Colossal Biosciences a créé en avril dernier une souris modifiée pour exprimer les gènes de poils laineux du mammouth, connus grâce à l'ADN récupéré sur les corps de *Mammuthus primigenius* découverts dans le pergélisol sibérien. Son objectif affiché est de « déséteindre » l'espèce ainsi que celle du célèbre dodo de l'île Maurice (*photo*). En réalité, elle pourra, au mieux « mammouthiser » un éléphant ou donner des traits du dodo à un oiseau cousin. **R. F.**

La quête des ancêtres de l'humanité

RACINES Découverts en 2000 et 2001, respectivement au Kenya et au Tchad, *Orrorin tugenensis* (6 millions d'années), et *Sahelanthropus tchadensis*, « Toumaï » (7 millions d'années), se disputent le titre de grand ancêtre de l'humanité. Le fémur allongé du premier le classe du côté des bipèdes occasionnels, mais il était aussi adapté au monde des arbres. Le trou occipital du crâne du second, par lequel s'attachait sa colonne vertébrale, indique qu'il était aussi bipède. Sinon, il se déplaçait à quatre pattes, peut-être sur les branches. Seules de nouvelles découvertes permettront de compléter le tronc de notre arbre généalogique. **R. F.**

Ces tombeaux qui restent à découvrir

CÉLÉBRITÉS L'archéologie a encore de prestigieuses découvertes devant elle. Car un certain nombre de tombes de grandes personnalités restent à trouver. C'est le cas de celles de Cléopâtre, dernière reine de l'Égypte ptolémaïque, dont l'emplacement de la sépulture demeure à ce jour l'un des mystères archéologiques les plus persistants, ou encore celui du somptueux mausolée d'Alexandre le Grand, roi de Macédoine et l'un des personnages les plus célèbres de l'Antiquité (*photo*). Momifié à la manière des pharaons, son corps fit l'objet d'un véritable culte avant d'être perdu, aux alentours du IV[e] siècle de notre ère. **M. B.**

Déchiffrer les écritures récalcitrantes

CIVILISATION Avec les progrès de l'intelligence artificielle, il est permis d'espérer qu'au cours des prochaines années, les chercheurs viennent enfin à bout des dernières écritures anciennes non encore déchiffrées. Parmi elles, l'écriture pictographique de l'Indus, civilisation de la vallée éponyme, qui résiste aux spécialistes, ou encore le linéaire A, utilisé dans la Crète ancienne à l'époque minoenne (*photo*). Si son écriture commence à être mieux comprise, la langue étrusque, elle aussi, reste globalement inconnue. **M. B.**

AKG IMAGES ; COLLECTION DAGLI ORTI / AURIMAGES

LES CROISIÈRES DU SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

TRÉSORS EN ÉGYPTE
DU GRAND MUSÉE AU NIL ÉTERNEL

du 11 au 21 mars 2026

11 JOURS - 10 NUITS

CROISIÈRE EXCLUSIVE SCIENCES ET AVENIR

Sciences et Avenir vous propose de partir en mars 2026 à la découverte du Grand Musée Égyptien du Caire (GEM), le plus grand musée d'égyptologie au monde qui ouvrira officiellement ses portes fin 2025. Le GEM abrite plus de 100.000 pièces retraçant 30 siècles d'histoire. Vous embarquerez ensuite pour une Croisière du Savoir sur le Nil en dahabeya 4 étoiles (nl), portés par le vent et les courants du fleuve vers les sites antiques de la Vallée des Rois, d'Edfou, Kom Ombo, Philae, Abou Simbel, Esna, Karnak et Louxor...

À partir de
4 850 €/pers.
Chambre double au départ de Paris

EXCURSIONS INCLUSES

AVEC LA PARTICIPATION DE :

Pascal Vernus

Égyptologue et ancien directeur d'études à l'École Pratique des Hautes Études (EPHE), auteur de plus d'une vingtaine d'ouvrages dont le Dictionnaire amoureux de l'Égypte pharaonique (Plon).

Mathieu Nowak

Rédacteur en chef de Sciences et Avenir.

Embarquez pour une croisière respectueuse de l'environnement en dahabeya.

Les dahabeyas sont des bateaux traditionnels éco-responsables, à taille humaine. Propulsées par deux voiles et sans moteur, elles s'appuient sur le souffle du vent et sur le courant du fleuve pour naviguer sur le Nil. En l'absence de vent, une petite embarcation à moteur assure le remorquage sans altérer la quiétude du voyage.

RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS

PLEIN CAP « Croisières du Savoir »
CROISIÈRES PLEIN CAP : 251 ROUTE DE LA COLLE - 06270 VILLENEUVE-LOUBET
info@plein-cap.com - Tél. 04 93 20 21 20

JEUX

Quiz nature

Trous noirs, physique quantique, intelligence artificielle, araignées venimeuses, légende d'Arthur et Merlin ou désextinction du mammouth laineux… L'actualité scientifique de l'année passée a été très riche. L'avez-vous suffisamment suivie pour répondre à ces questions ? À vous de jouer !

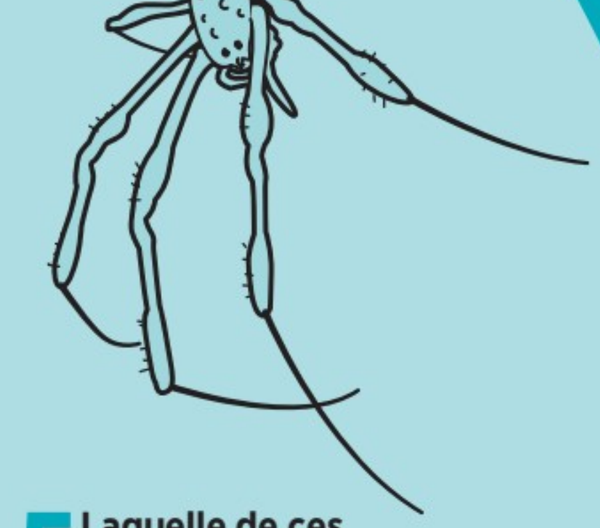
Par Marie Parra et Marie-Virginie Speller
Illustrations : Bruno Bourgeois

1 Quelle est la taille du caméléon miniature, *Brookesia nofy*, découvert l'année dernière ?
A. 0,3 mm.
B. 3 mm.
C. 3 cm.

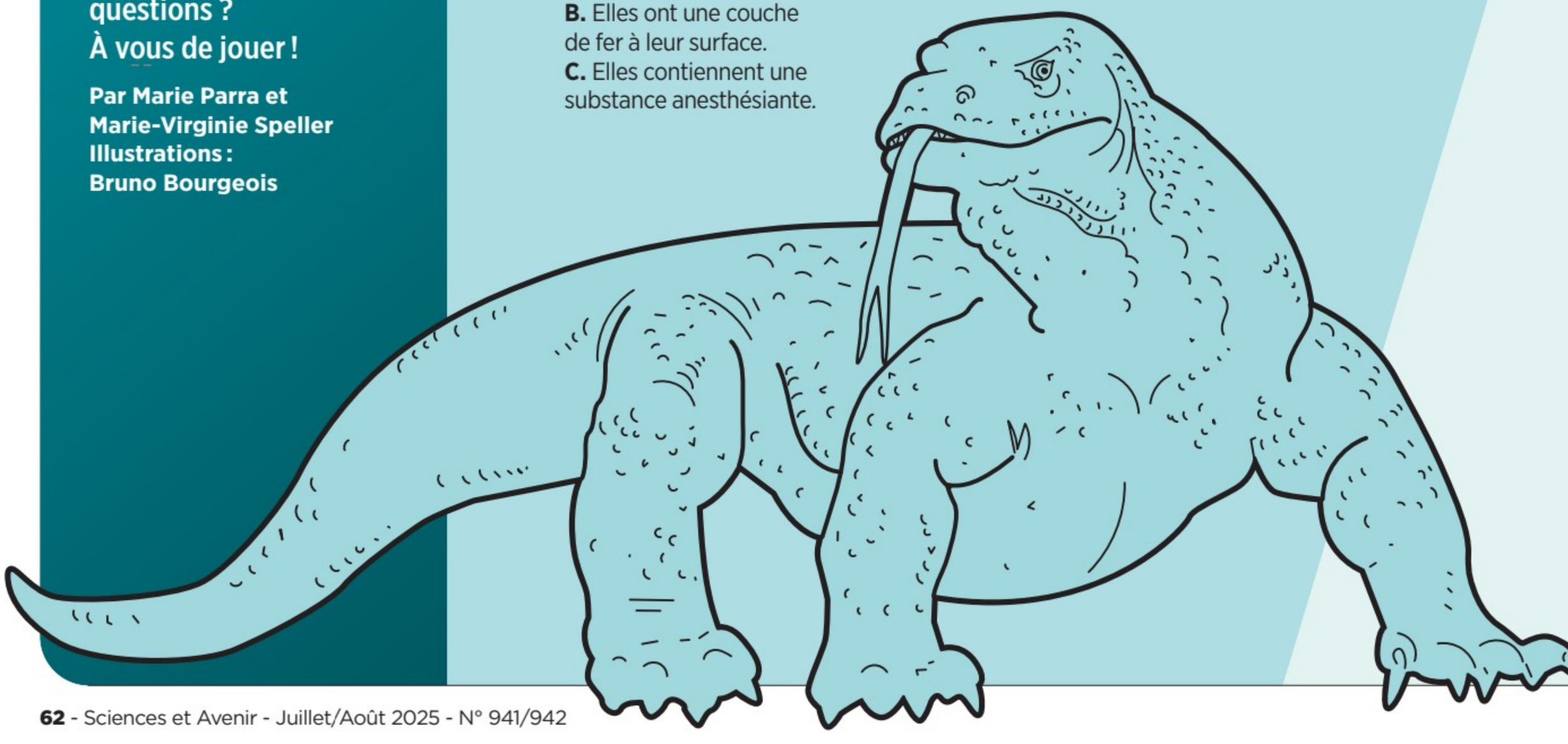
2 Quels sont les principaux puits terrestres de carbone ?
A. Les zones humides.
B. Les forêts.
C. Les neiges éternelles.

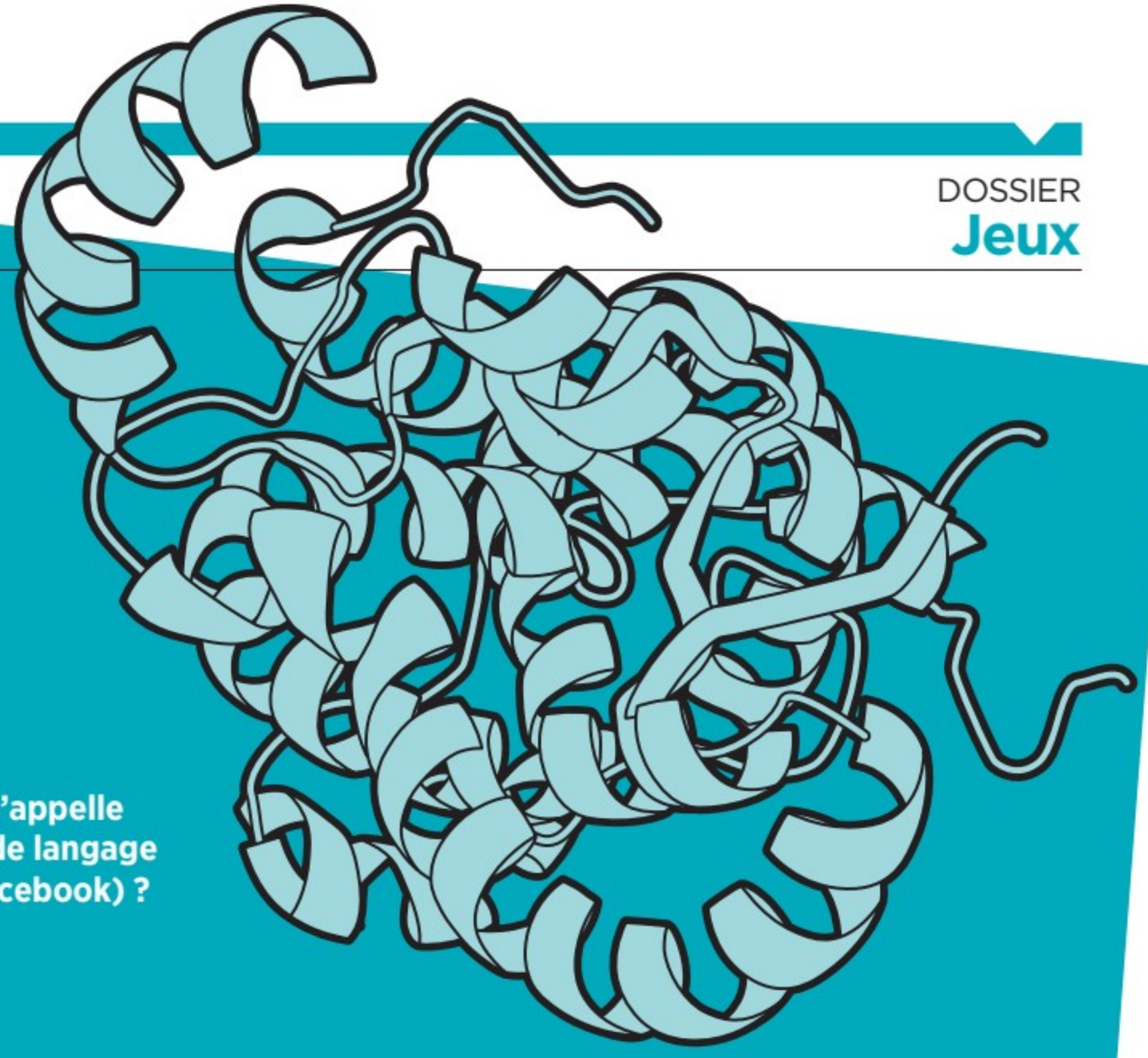
3 Qu'est-ce que l'Amoc ?
A. Une organisation internationale pour la conservation des océans.
B. Un ensemble de courants océaniques complexes comprenant le Gulf Stream.
C. Une technique de cartographie des fonds marins développée par la Nasa.

4 Quelle est la particularité des dents des dragons de Komodo ?
A. Elles poussent continuellement.
B. Elles ont une couche de fer à leur surface.
C. Elles contiennent une substance anesthésiante.



5 Laquelle de ces araignées est considérée comme la plus venimeuse au monde ?
A. *Latrodectus mactans*, la veuve noire d'Amérique.
B. *Theraphosa blondi*, l'araignée Goliath.
C. *Atrax robustus*, l'araignée à toile-entonnoir de Sydney.





Quiz fonda

1 Que voit-on quand on photographie un trou noir ?
A. Rien.
B. Un disque noir entouré d'un anneau lumineux.
C. Une sphère sombre.

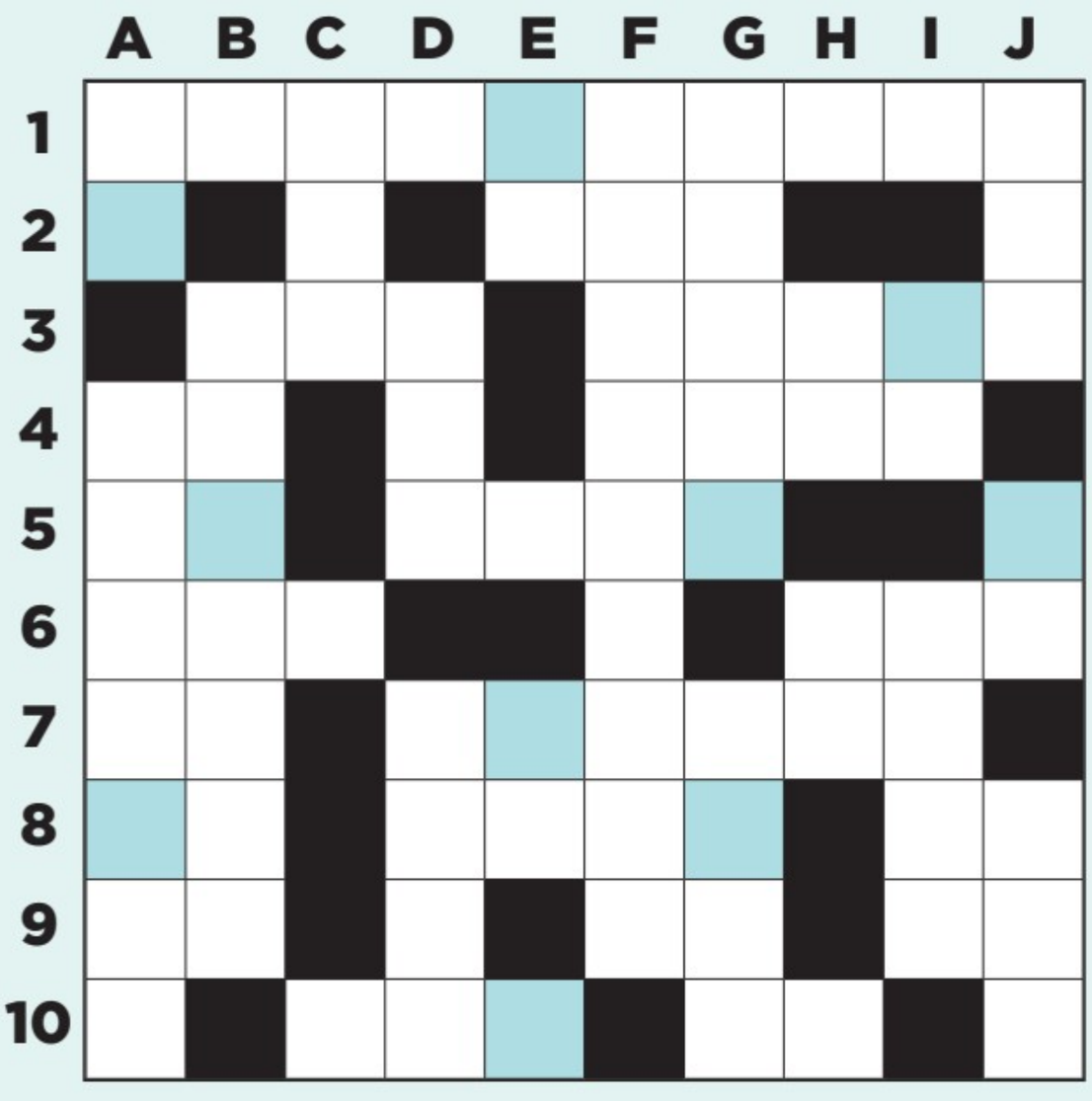
2 Comment s'appelle le modèle de langage de Meta (ex-Facebook) ?
A. ChaCal.
B. LlaMa.
C. PanDa.

3 Qu'est-ce que l'intrication en physique quantique ?
A. Un phénomène où des particules restent liées entre elles, toute action sur l'une ayant des répercussions sur l'autre, et cela quelle que soit la distance qui les sépare.
B. Un processus par lequel deux particules échangent spontanément leurs propriétés physiques lors d'une interaction.
C. La superposition d'une particule et de son anti-particule.

4 Pourquoi la structure des protéines, prédite par Alphafold, recèle autant d'importance ?
A. Parce qu'elle révèle la quantité d'énergie que la protéine peut stocker.
B. Parce qu'elle permet de savoir combien de temps la protéine reste active dans le corps.
C. Parce que la forme d'une protéine détermine sa fonction.

Mots croisés

Complétez la grille à l'aide des définitions suivantes et découvrez le mot qui se cache derrière les cases bleues (axiomes ou postulats) :



HORIZONTALEMENT

1. Elle étudie les objets célestes
2. À nous
3. Prononces – Sciences dures
4. Fer du labo – Elles ont sauvé le Capitole selon la légende
5. Forte carte – Nombres égaux à zéro
6. Voie – Lié
7. Instrument du hasard – Œuf fécondé
8. Agent de liaison – Sens de l'écoute – Unité astronomique
9. Graphème – Obtenu – Dédain
10. Cardinal – Son au 1er sous-sol

VERTICALEMENT

A. C'est pour rire – Embarras
B. Passée
C. Classement
D. Son mur est difficile à franchir – Parcs
E. Tait son nom – 112 litres
F. Elle étudie les lois d'un certain domaine
G. Hasardais – À ne pas mettre dans le même panier que les autres
H. Réfléchi – Vieux Do
I. K.-O. – Il n'y a pas de plus grand chiffre
J. Grugés – Nombre célèbre – Mal exprimé

Solutions des jeux page 67

1 Les loups butinent des fleurs.

2 Les Vikings sont allés jusqu'en Antarctique.

Vrai ou faux ?

3 Des chercheurs ont découvert une thérapie pour faire repousser les dents.

4 Le nouvel état dit supersolide découvert cette année pourrait permettre de mieux comprendre l'énergie noire.

5 Il y a des cas de peste chaque année aux États-Unis.

Quiz santé

1 Combien y a-t-il d'organes dans le corps humain ?
A. 63.
B. 75.
C. 80.

2 Où est sécrétée GLP-1, cette molécule à l'origine de l'Ozempic par exemple, et dont on découvre les multiples effets bénéfiques ?
A. Dans le cerveau.
B. Dans l'estomac.
C. Dans les intestins.

3 Quel est le coût lié aux maladies vectorielles transmises par les moustiques dans le monde ?
A. 25 milliards d'euros.
B. 53 milliards d'euros.
C. 91 milliards d'euros.

4 Quelles cellules communiquent grâce à des signaux électriques ?
A. Les cellules épithéliales.
B. Les cellules immunitaires.
C. Les fibroblastes.

5 L'année dernière, des chercheurs ont amélioré les cellules CAR-T, utilisées pour éliminer certaines tumeurs. De quelle évolution s'agit-il ?
A. Elles produisent des anticorps capables de tuer tous les types de cellules cancéreuses.
B. Elles peuvent se repérer dans le corps jusqu'à atteindre l'organe concerné.
C. Elles préviennent l'apparition de cellules cancéreuses sur une année complète.

Quiz histoire

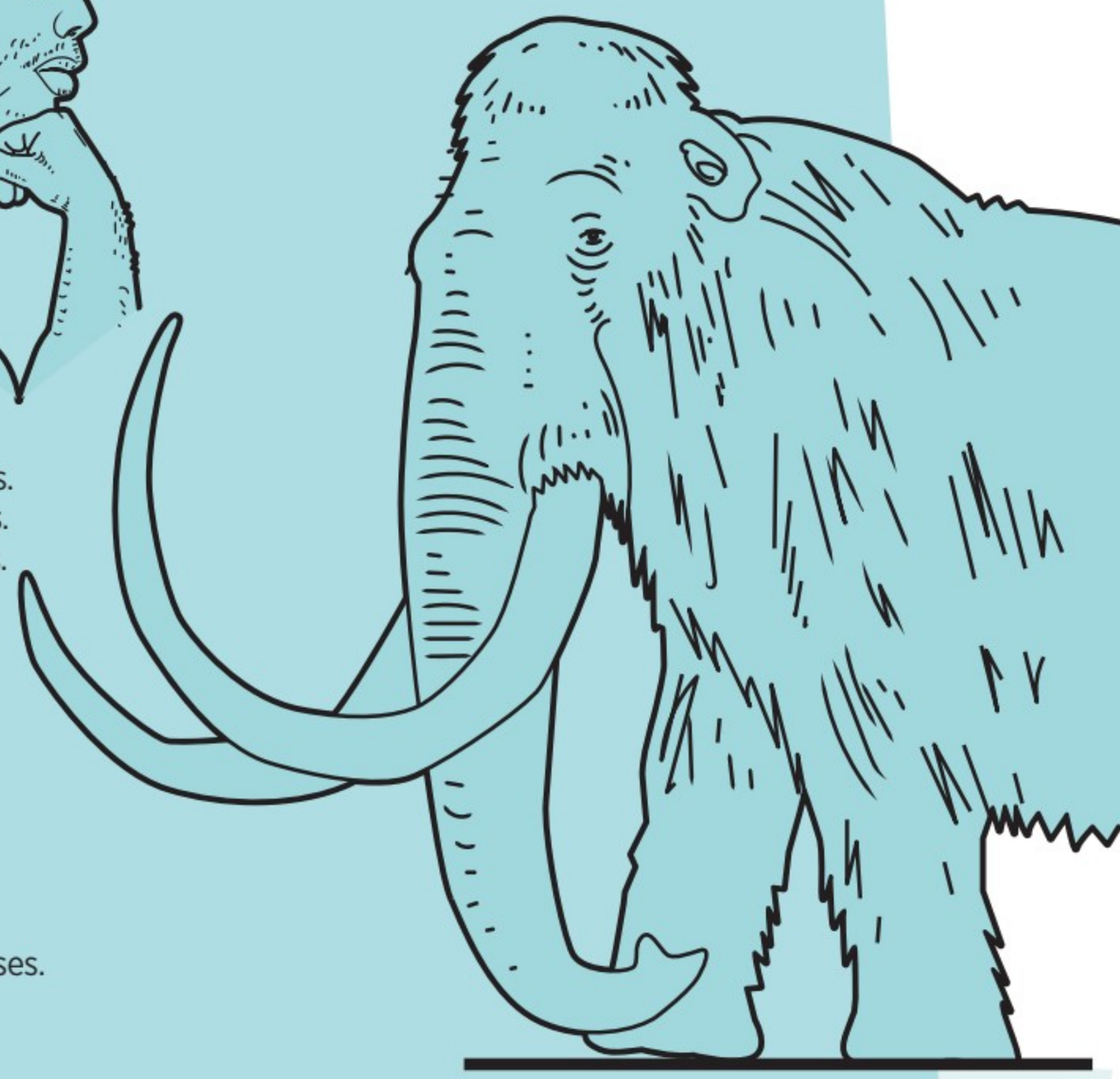
1 Quel organe a été retrouvé vitrifié à Herculanum après l'éruption du Vésuve ?
A. Un œil.
B. Un cerveau.
C. Une vessie.

2 Où a été découvert l'un des manuscrits de la légende d'Arthur et Merlin ?
A. Dans une tapisserie galloise.
B. Dans la reliure d'un registre.
C. Dans un coffre à double fond.

3 Qu'espère-t-on retrouver près de la chaussure de Sandy Irvine sur les pentes de l'Everest ?
A. Une montre.
B. Une lettre.
C. Un appareil photo.

4 De quand daterait le tout premier métissage de l'homme moderne avec Neandertal ?
A. De -49 000 à -45 000 ans.
B. De -42 000 à -38 000 ans.
C. De -35 000 à -29 000 ans.

5 Quel animal a été génétiquement modifié par l'entreprise américaine Colossal dans son projet de désextinction du mammouth laineux ?
A. Une souris laineuse.
B. Un cochon d'Inde à défenses.
C. Un rat résistant au froid.



Sudoku

3					1	4		
	2		4	6			8	
		8	2					1
2		3	5		6	8		4
	5			3			9	
8		9	7		2	1		5
5					7	3		
	3			1			5	
		4	3					7

Qui suis-je ?

1 Je suis un petit robot explorateur. J'ai parcouru Mars pendant des années et découvert à sa surface de longues chaînes moléculaires probablement issues d'acides gras. Je me suis aussi chanté *« Joyeux anniversaire »* tout seul.

2 Je régnais en maître au crétacé supérieur. Carnivore, et même cannibale, je disposais d'une double rangée de dents redoutables. Mon premier fossile a été découvert près de la Meuse en 1764, ce qui a inspiré mon nom.

3 En 2025, on célèbre trois de mes anniversaires : deux concernent mes théories sur l'espace et le temps, le dernier est celui de ma mort. Je suis devenu mondialement connu avec une équation aussi courte qu'universelle. Mon nom est synonyme de génie.

Solutions des jeux page 67

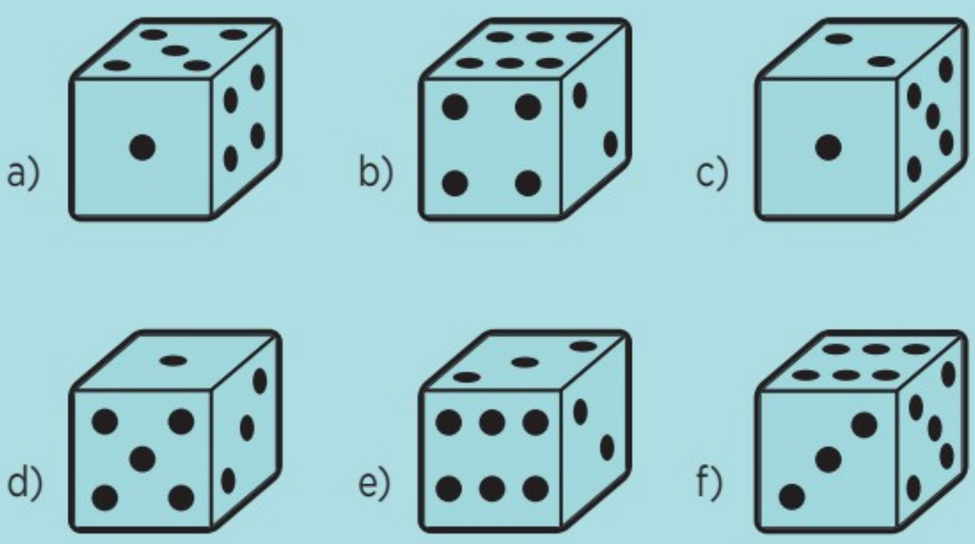
SOLUTIONS DES JEUX

Énigmes

1 Quatre explorateurs participent à une mission pour identifier une nouvelle espèce de grenouille bioluminescente en Amazonie. Mais l'un d'entre eux a falsifié son rapport d'observation. Voici ce qu'ils déclarent :
Lina : Ce n'est pas moi.
Émile : C'est Hugo.
Hugo : C'est Sarah.
Sarah : Émile a tort.
Sachant qu'un seul des explorateurs ment, qui a falsifié son rapport ?
Difficulté *

2 Un garçon descend l'escalier roulant du métro et compte 45 marches. Puis, avec la même vitesse, il monte ce même escalier roulant et compte 225 marches.
Combien de marches aurait-il comptées si l'escalier roulant était fixe ?
Difficulté ***

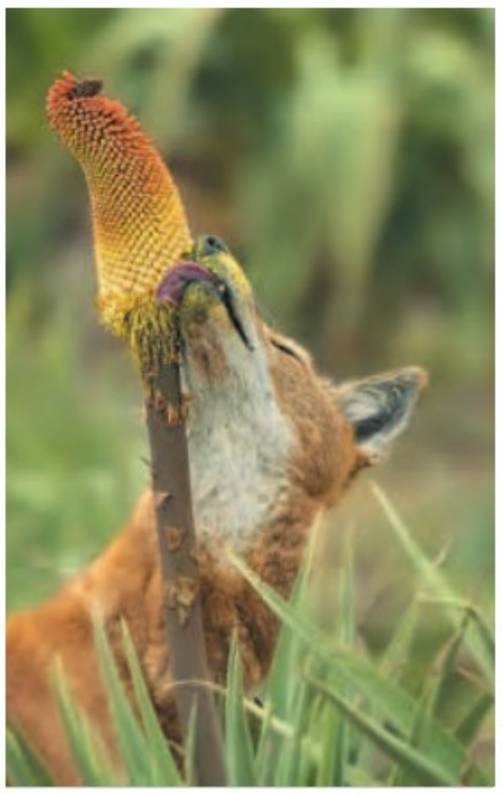
3 Sur un dé, fidèlement représenté à gauche, chaque face porte des points de un à six et la somme des points marqués sur des faces opposées est toujours égale à sept.
Quels sont les dés présentant des anomalies, sachant qu'il faut aussi tenir compte de l'orientation des diagonales de points ?
Difficulté **



PAGE 62
Quiz nature
1. C / **2.** A / **3.** B / **4.** B / **5.** C

PAGE 63
Quiz fonda
1. B / **2.** B / **3.** A / **4.** C

PAGE 64
Vrai ou faux ?
1. Vrai. Des chercheurs de l'Ethiopian Wolf Conservation Programm ont découvert que les loups d'Éthiopie se nourrissent de nectar.


ADRIEN LESAFFRE

2. Faux. Mais ils sont allés jusqu'en extrême Arctique pour s'approvisionner en ivoire.

3. Vrai. Des chercheurs japonais sont parvenus à agir sur un gène qui bloque la repousse naturelle des dents.

PAGE 63
Mots croisés - Mot caché : HYPOTHÈSES

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	A	S	T	R	O	N	O	M	I	E
2	H	■	R	■	N	O	S	■	■	U
3	■	D	I	S	■	M	A	T	H	S
4	F	E	■	O	■	O	I	E	S	■
5	A	S	■	N	U	L	S	■	■	P
6	R	U	E	■	■	O	■	U	N	I
7	D	E	■	Z	Y	G	O	T	E	■
8	E	T	■	O	U	I	E	■	U	A
9	A	E	■	O	■	E	U	■	F	I
10	U	■	E	S	T	■	F	A	■	E

PAGE 65
Sudoku

3	7	6	8	5	1	4	2	9
1	2	5	4	6	9	7	8	3
9	4	8	2	7	3	5	6	1
2	1	3	5	9	6	8	7	4
4	5	7	1	3	8	2	9	6
8	6	9	7	4	2	1	3	5
5	9	1	6	8	7	3	4	2
7	3	2	9	1	4	6	5	8
6	8	4	3	2	5	9	1	7

4. Faux. Cet état entre cristal et superfluide pourrait éclairer des phénomènes se déroulant au cœur des étoiles à neutrons.

5. Vrai. En moyenne 10 cas par an.

PAGE 64
Quiz santé
1. C / **2.** C / **3.** C / **4.** A / **5.** B

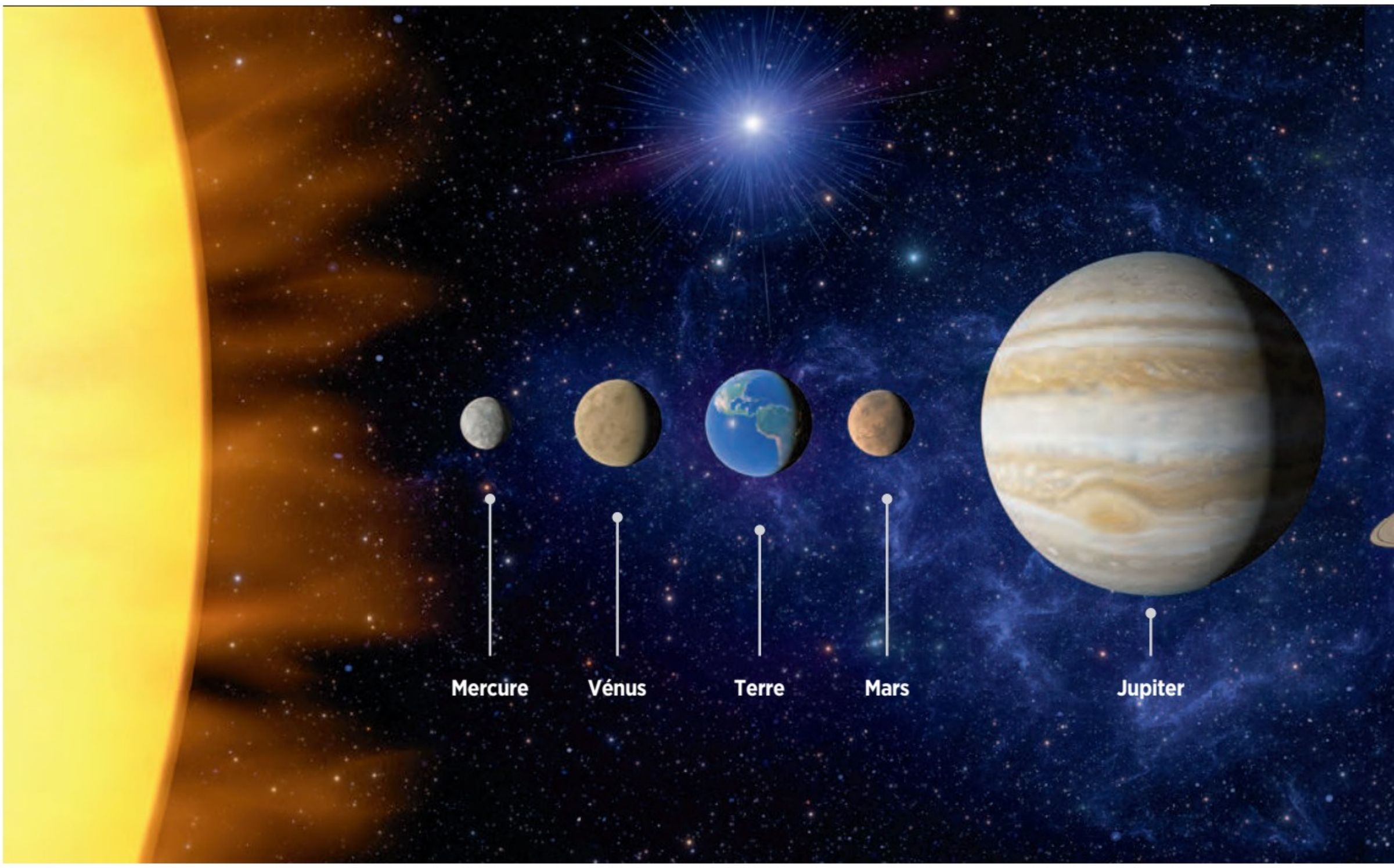
PAGE 65
Quiz histoire
1. B / **2.** B / **3.** C / **4.** A / **5.** A

PAGE 65
Qui suis-je ?
1. Curiosity.
2. Le mosasaure.
3. Albert Einstein.

PAGE 66
Énigmes
1. Sarah a falsifié son rapport. En effet, si c'est Lina, alors Lina ment, donc Hugo ment aussi. Ce qui est impossible puisqu'il n'y a qu'un seul menteur. Si c'est Hugo qui a falsifié son rapport, alors il ment, Sarah dit la vérité, donc Émile ment aussi. Si c'est Émile, alors Émile ment. Mais dans ce cas Hugo ment aussi. Sarah a donc falsifié ses données. Ainsi, Lina, Hugo et Sarah disent la vérité, et Émile est le menteur.

2. On prend n = le nombre de marches qui disparaissent. Le garçon ayant toujours la même vitesse, s'il compte 45 marches dans un sens et 225 dans l'autre, c'est donc qu'il passe 225/45 = 5 fois plus de temps sur l'escalier à contre-sens.
On pose donc : $45 + n = 225 - (225/45) \times n$.
Donc $n = 30$ marches.
m = le nombre de marches que le garçon aurait compté si l'escalier roulant avait été fixe, on a donc :
$m = 45 + n = 225 - 5n = 75$ marches.

3. Les mauvais dés sont c et e. Pour le dé e, la diagonale de points formée sur la face 2 était mal orientée.

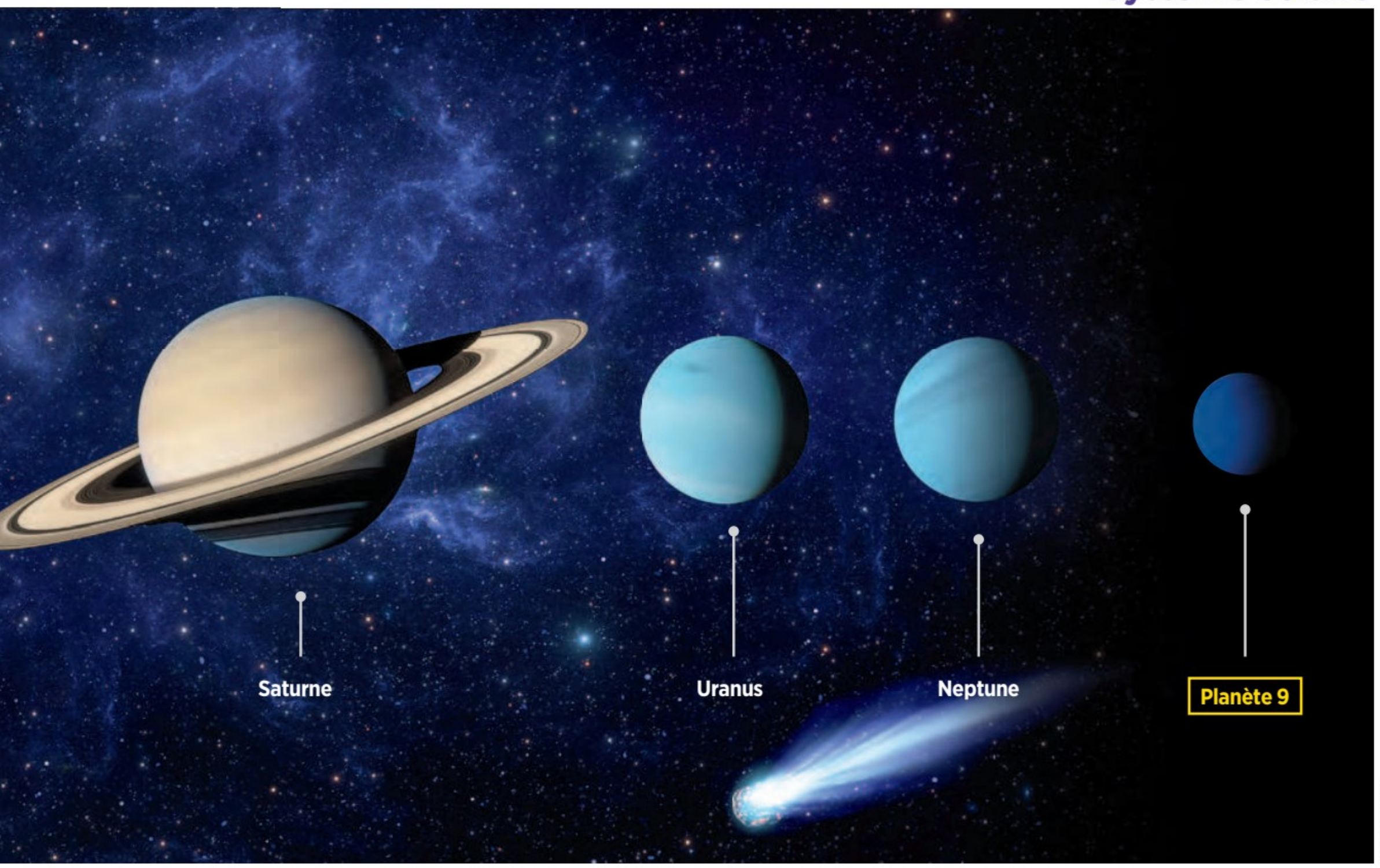


Planète 9

Après la théorie, l'heure de l'observation

Des astronomes suspectent l'existence d'une nouvelle planète dans les parties les plus froides et les plus éloignées du Système solaire. À partir de 2026, le nouvel observatoire Vera-Rubin, conçu pour fournir une cartographie ultra-précise du cosmos, mettra peut-être en évidence cette neuvième planète qui divise tant la communauté scientifique.

Par Franck Daninos



GETTY IMAGES

C'est un Système solaire que les moins de 20 ans ne peuvent pas connaître. Avec un cortège de planètes composé de Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune… et aussi Pluton — jusqu'à ce que l'Union astronomique internationale décide en 2006 que cette dernière n'en est pas vraiment une et la relègue au statut moins vénérable de « planète naine ». Mais ce club très fermé pourrait bientôt compter à nouveau neuf membres. Car des astronomes suspectent l'existence d'une nouvelle planète dans les parties les plus froides et les plus éloignées du Système solaire. Si reculées que les télescopes actuels ne peuvent la détecter directement. Seuls de subtils effets engendrés sur son voisinage trahiraient sa présence, même si les experts s'écharpent depuis une dizaine d'années sur la signification et la réalité même de ces conclusions. Or, un observatoire qui a dévoilé le 23 juin ses premières images, le Vera-Rubin installé au Chili, mettra prochainement tout le monde d'accord. Grâce à son miroir primaire de 8,4 mètres de diamètre et sa caméra de 3,2 milliards de pixels, la plus grande jamais construite, il révolutionnera de nombreux domaines de l'astronomie (*lire l'encadré p. 71*) et fournira *« des informations décisives sur l'existence ou non d'une neuvième planète »*, trépigne Alessandro Morbidelli, chercheur à l'observatoire de la Côte-d'Azur et professeur au Collège de France.

Plusieurs corps célestes découverts au-delà de Pluton

L'histoire commence au début des années 2000. Les astronomes découvrent alors que Pluton, qui est plus petite (2370 km de diamètre) que la Lune et se situe à environ 6 milliards de kilomètres du Soleil (soit 40 fois la distance entre la Terre et notre étoile, appelée « unité astronomique » ou simplement UA), n'est pas aussi isolée qu'ils le pensent. D'autres corps similaires évoluent dans son entourage, tel Eris (2320 km de diamètre) repéré en 2003. Certains croisent même son orbite, ce qui précipitera son éviction de la famille des planètes (*lire l'encadré p. 70*). Mais des objets beaucoup plus lointains que Pluton sont aussi mis en évidence. En 2003 également, une équipe dirigée par Mike Brown ▶

▲ **Après avoir perdu Pluton** en 2006, le Système solaire est en passe de retrouver une neuvième planète, dont le nom provisoire correspond à son numéro.

de l'Institut de technologie de Californie (Caltech), aux États-Unis, identifie ainsi Sedna, dont l'orbite est aussi distante qu'allongée. Dans sa course autour du Soleil, elle se situe au plus proche (un point appelé périhélie) à 76 UA… et au plus loin à 937 UA ! On nommera ainsi « objets transneptuniens extrêmes » (OTNE) ces astres dont le périhélie est localisé à plus de 30 UA du Soleil et qui seront progressivement débusqués (on en recense une quarantaine aujourd'hui). *« En raison de leur éloignement, leur faible luminosité et leurs orbites elliptiques, les OTNE sont très difficiles à observer et ne peuvent l'être que lorsqu'ils se rapprochent du Soleil,* relève Sean Raymond, du Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux. *Ils demeurent ainsi énigmatiques mais joueront un rôle déterminant dans la traque d'une nouvelle planète.* »

HERNAN STOCKEBRAND/VERA RUBIN OBSERVATORY

Une planète beaucoup plus massive que la Terre

L'hypothèse est avancée pour la première fois en 2014 par Chadwick Trujillo de l'observatoire Gemini à Hawaï et Scott Sheppard de l'Institut Carnegie à Washington, aux États-Unis. En étudiant Sedna et quelques autres corps très éloignés, ils remarquent un phénomène étrange. Leurs orbites paraissent en effet alignées et leurs périhélies confinés dans une même région de l'espace. Or, à de telles distances, où l'influence gravitationnelle de Neptune et des autres planètes géantes ne se fait plus sentir, on s'attend au contraire à des distributions aléatoires. Quelque chose semble donc perturber le comportement de ces astres… Pour l'expliquer, le duo d'astronomes suggère ainsi l'existence d'une planète encore inconnue et beaucoup plus massive que la Terre aux confins du Système solaire. *« Leur présomption est toutefois peu étayée,* rappelle Alessandro Morbidelli. *L'accueil a été plutôt tiède, j'étais moi-même très sceptique.* » Deux ans plus tard, Mike Brown et son collège Konstantin Batygin du Caltech se montrent plus convaincants. *« Les analyses qu'ils font des dynamiques orbitales sont beaucoup plus précises et rigoureuses* », note Sean Raymond. Elles indiquent que les périhélies de six OTNE sont comme verrouillés par la force gravitationnelle d'une planète très lointaine, dont les caractéristiques commencent à être estimées. L'astre serait de cinq à dix fois plus massif que la Terre. Par rapport aux autres planètes du Système solaire, il évoluerait sur une orbite inclinée d'environ 20°. Et celle-ci ne serait pas circulaire mais elliptique, avec un demi-grand axe (la distance entre le centre et le point le plus éloigné de l'ellipse) compris entre 400 et 800 UA. Cela signifie que l'hypothétique « planète 9 », comme on commence alors à l'appeler, mettrait *« entre 10 000 et 20 000 ans à compléter une révolution autour du Soleil* », signale Konstantin Batygin — contre 165 ans, à titre de comparaison, pour Neptune. Selon des modélisations réalisées peu après à l'université de Berne, en Suisse, elle serait constituée d'un mélange de roches silicatées et de glaces, enveloppé d'hydrogène et d'hélium gazeux où la température ne dépasse pas -220 °C. *« Il s'agirait d'une sorte de mini-Neptune,* pose Alessandro Morbidelli. *Un type de planète très courant autour d'autres étoiles mais jamais observé encore dans le Sys-*

CLASSIFICATION

Pourquoi Pluton n'est pas une planète

Trois critères ont été retenus en 2006 par l'Union astronomique internationale pour qu'un objet céleste soit considéré comme une planète. Il doit orbiter autour du Soleil ; être suffisamment massif pour que la gravité lui confère une forme sphérique ; et être seul sur son orbite, dégagée de tout débris. Une troisième condition qui n'était pas remplie par Pluton, ont découvert les astronomes au début des années 2000, cette dernière perdant alors le statut de 9e planète du Système solaire qu'elle détenait depuis 1930.

INSTRUMENT

Les révélations très attendues de l'observatoire Vera-Rubin

Vingt ans après le lancement du projet, l'observatoire Vera-Rubin est prêt à cartographier le cosmos. *« Après d'ultimes réglages sur le traitement des données, les premiers relevés seront produits début 2026 »*, annonce Sandrine Thomas, directrice adjointe de la construction. Depuis le sommet de la montagne chilienne du Cerro Pachón (2680 mètres), le télescope prendra chaque nuit quelque 800 clichés du ciel austral couvrant chacun une surface équivalente à 45 fois celle de la Lune. Soit 20 téraoctets de données, traitées notamment par un laboratoire du CNRS à Lyon, partenaire du projet. De la taille d'une petite voiture, la caméra de 3,2 milliards de pixels intègre un système de changeur de filtres optiques inédit, conçu par trois autres laboratoires français. De quoi produire *« un enregistrement ultra-large, en couleurs et en très haute définition de l'Univers »*, se réjouit Sandrine Thomas. Cette « machine à découvrir » servira en particulier à étudier la position et la forme de millions de galaxies. Et mieux comprendre, ce faisant, la répartition de la matière noire et de l'énergie sombre, deux mystérieuses substances constituant plus de 90 % du cosmos. Mais les prises de vues répétées du Vera-Rubin en feront aussi un instrument de choix pour détecter des phénomènes fugaces et transitoires, telles des étoiles variables ou des supernovae. Et *« dans le Système solaire, il mettra en évidence une multitude de nouveaux corps »*, assure la physicienne. Peut-être une neuvième planète, mais assurément une foule d'astéroïdes, de lunes et d'objets gravitant au-delà de Neptune.

tème solaire. » Tous les scientifiques ne sont pas convaincus. À partir de 2018, plusieurs chercheurs mettent en cause le trop petit nombre d'OTNE sur lequel reposent ces hypothèses — pas statistiquement significatif selon eux. Ils pointent aussi des problèmes méthodologiques : des biais de sélection liés à la manière dont les observations ont été collectées et mises à profit. *« Les OTNE ont été découverts par différents télescopes dans des circonstances diverses,* explique Sean Raymond. *Et en scrutant le ciel uniquement dans les régions où ils sont plus faciles à repérer — jamais dans le plan galactique, par exemple, où une multitude d'étoiles empêche de les voir. »*

En 2021, un groupe de l'université du Michigan, aux États-Unis, jette ainsi de sérieux doutes sur l'existence de cette nouvelle planète. En analysant 14 OTNE identifiés par trois relevés astronomiques différents, il montre que les périhélies ne sont pas regroupés mais dispersés de façon aléatoire si l'on prend en compte les biais de sélection.

Seule l'observation mettra fin à la controverse

Le groupe de chercheurs simule aussi le comportement de myriades d'OTNE répartis uniformément dans le Système solaire externe. Et constate que de petits échantillons, par une sorte d'effet de loupe, présentent des orbites qui semblent à tort alignées.

Cette planète ne serait-elle ainsi qu'un mirage ? Mike Brown et Konstantin Batygin n'en démordent pas, opposant aux détracteurs leurs propres faiblesses méthodologiques. Cherchant aussi d'autres preuves, ils exposent avec Alessandro Morbidelli en 2024 un nouveau type d'argument. Il est fondé sur une classe d'objets transneptuniens moins distants, donc plus faciles à observer et moins sujets aux biais observationnels : des astéroïdes de quelques dizaines de kilomètres de diamètre appelés « centaures ». Leurs périhélies se situant à moins de 30 UA, ils croisent périodiquement l'orbite de Neptune qui modifie alors leur trajectoire en les éjectant du Système solaire. Leur population devrait donc peu à peu se tarir… À moins qu'un astre lointain possédant les caractéristiques de la planète 9 envoie continûment, grâce à son champ gravitationnel, de nouveaux objets vers Neptune ! *« Nous avons analysé les orbites de 17 de ces astéroïdes : elles s'expliquent*

FREDERIQUE PLAS

« Il s'agirait d'une mini-Neptune, un type de planète très courant autour d'autres étoiles mais jamais observé encore dans le Système solaire »

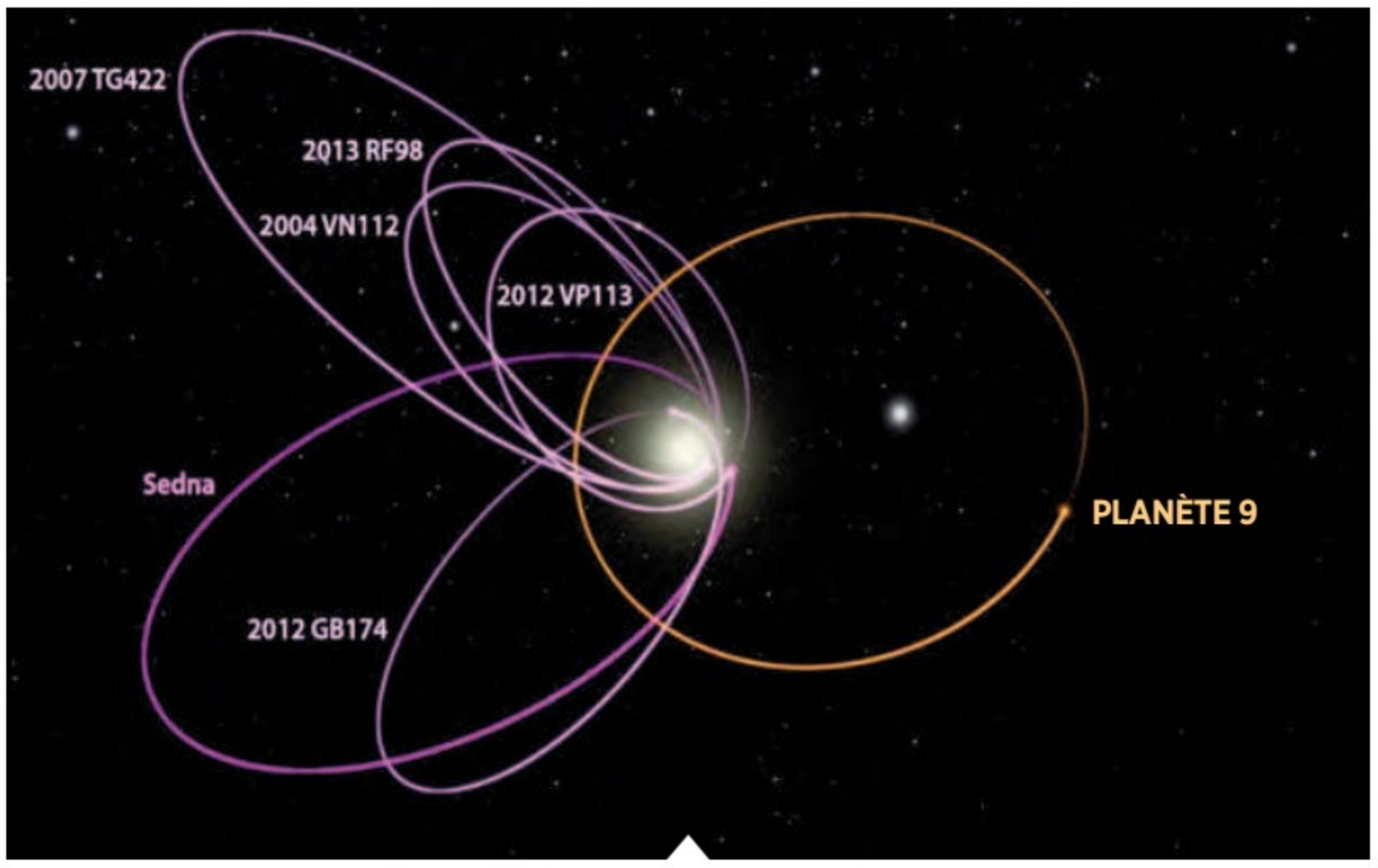
Alessandro Morbidelli, chercheur à l'observatoire de la Côte-d'Azur et professeur au Collège de France

très bien en intégrant l'existence d'une telle planète et deviennent incompréhensibles si on la supprime », jubile Konstantin Batygin. Plus qu'une indication supplémentaire, ces résultats constituent *« l'argument le plus fort en faveur de la planète 9 »*, abonde Sean Raymond.

Cette détection aurait une portée historique majeure

Tout en restant *« le plus objectif possible »*, Alessandro Morbidelli est désormais convaincu *« à 75 % que cette planète existe »*. Il reconnaît cependant que les données actuelles ne permettent pas de trancher : *« Seul Vera-Rubin pourra mettre fin à cette controverse. »* À partir de janvier 2026, cet observatoire financé en majeure partie par la Fondation américaine pour la science photographiera en un peu plus de trois jours de façon répétée l'intégralité du ciel austral. Et dévoilera ainsi, peu à peu, une kyrielle d'objets mouvants et peu lumineux du Système solaire… à l'instar de la fantomatique planète 9 ! Selon les estimations d'une équipe américaine, ce télescope aurait environ *« 60 % de chances de l'observer directement »*, signale Sean Raymond. Il pourrait en effet ne pas la voir *« si, par un malheureux hasard, elle se trouve actuellement dans la portion la plus éloignée de son orbite, si celle-ci croise le plan galactique et si ce corps est particulièrement sombre »*.

Quoi qu'il en soit, l'œil surpuissant du Vera-Rubin détectera des dizaines de nouveaux OTNE dont les orbites pourraient être sculptées par la planète 9, répondant ainsi aux critiques sur la statistique des petits nombres. Et puisqu'il réalisera des relevés complets et systématiques du ciel, il redécouvrira les OTNE déjà connus *« dont les biais observationnels pourront être modélisés de façon extrêmement rigoureuse,* insiste Alessandro Morbidelli. *On saura ainsi, d'ici un ou deux ans, si les preuves accumulées jusqu'ici étaient pertinentes. »* Si ce n'est pas le cas, les astronomes n'auront plus aucune raison d'invoquer une planète cachée… Mais si les orbites des OTNE sont bel et bien alignées, *« cela suffira à emporter l'adhésion, même en l'absence d'une détection directe »*, affirme l'astronome. La traque se poursuivrait alors sans relâche, avec le Vera-Rubin et une armada d'autres instruments, afin d'observer et confirmer enfin l'existence de la planète 9. Un événement qui aurait une portée historique majeure. *« Depuis l'Antiquité, seules deux planètes — Uranus et Neptune —* ont été mises en évid*ence,* s'enflamme Konstantin Batygin. *Cette découverte étendrait ainsi significativement nos connaissances sur la structure et la formation du Système solaire. »* ■



Les orbites d'astres (ellipses violettes) très éloignés du Soleil, tel Sedna, semblent groupées dans une région de l'espace en raison de l'hypothétique planète 9 (en orange).

SCÉNARIO

Quelle est l'origine de la planète 9 ?

« *La planète 9 serait née en même temps que les protoplanètes qui ont créé Uranus et Neptune* », alors que Jupiter et Saturne étaient déjà là, avance l'astronome Sean Raymond, coauteur d'une étude présentée en mai dans *Nature Astronomy*. Les deux géantes ont constitué une sorte de mur pour ces protoplanètes qui commençaient à se rapprocher du Soleil, âgé alors de quelques millions d'années. Certaines ont fusionné pour donner naissance à Uranus et Neptune, tandis que d'autres — à l'instar de la planète 9 — ont reçu des « coups de pied » gravitationnels allongeant peu à peu leurs orbites jusqu'à les éjecter vers l'extérieur du Système solaire. Mais l'amas stellaire où le Soleil s'est formé n'était pas encore dissipé. D'autres étoiles passant à proximité auraient repoussé ainsi la planète 9, modifiant à nouveau sa trajectoire et la stabilisant dans l'orbite qu'on suppose actuellement. *« Selon nos calculs, un tel scénario aurait eu 40 % de chances de se produire »*, précise Sean Raymond.

SCIENCES ET AVENIR

en collaboration avec Sciences et Avenir La Recherche

Les Îles Caraïbes

ALL INCLUSIVE

À L'OMBRE DU PARADIS ?

Un héritage colonial complexe
Une terre d'échanges fragile
Climat : le défi face aux ouragans

Les noms des Caraïbes, des Antilles et des Îles Vierges évoquent des images de plages de sable blanc, de mers turquoise, de paysages volcaniques verdoyants et de musiques envoûtantes.
Ces régions sont également imprégnées d'histoires et de légendes anciennes, comme celle de Sainte-Ursule et des onze mille vierges, qui ont donné leur nom à l'archipel des Îles Vierges.

La croisière inclura une visite à Saint-Domingue, capitale de la République dominicaine sur l'île d'Hispaniola, où se trouve l'un des meilleurs musées d'archéologie sous-marine de la région.

À bord, des conférences seront animées par des experts tels que l'historien Jean-Sébastien Guibert, qui aborderont des sujets tels que l'histoire antillaise, l'intensification possible des cyclones et leurs effets sur l'agriculture et la santé des populations... Cela permettra de compléter les connaissances plus générales sur la production sucrière, l'esclavage et le commerce colonial, « revisiter l'histoire antillaise par la mer, ses ports, ses hommes ». Vous offrant une occasion unique d'approfondir vos connaissances sur les Antilles, tant sur terre que sur mer.

Cette expérience promet d'être enrichissante et captivante, invitant les voyageurs à rêver et à découvrir les multiples facettes de ces îles.

Dominique LEGLU Présidente de l'AFAS

VOS CONFÉRENCIERS À BORD ! (2)

Dr Dominique Leglu, Présidente de l'association pour l'avancement des SCIENCES (AFAS).

Jean-Sébastien Guibert, Maître de conférences en histoire et archéologie maritime à l'université des Antilles. .

LES POINTS FORTS

- UN VOYAGE TOUT INCLUS À BORD DU COSTA FASCINOSA 5*
- VOLS ALLER-RETOUR AU DÉPART DE PARIS
- PENSION COMPLÈTE ET BOISSONS INCLUSES À VOLONTÉ À BORD DU BATEAU
- ACCOMPAGNEMENT, ANIMATIONS ET CONFÉRENCES EXCLUSIVES AVEC NOS CONFÉRENCIERS

À BORD DU COSTA FASCINOSA 5*

DU 22 AU 30 JANVIER 2026

A PARTIR DE **1 990 €** / PERS.(1)

En occupation double en cabine intérieure au départ de Paris

Graph. Atelier Pascale M (26) Photo plage : Azzedine Rouichi Unsplash

MYCOMM. Experiences

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-caraibes.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Le mystère persistant des black-out électriques

Les autorités européennes ont six mois pour enquêter sur la panne de réseau électrique qui a touché l'Espagne et le Portugal fin avril. Ce type d'événement bien connu des experts alimente la recherche sur la résilience des réseaux.

Le 28 avril 2025 à 12 h 33, l'Espagne et le Portugal subissent une panne générale de leurs réseaux électriques. Les premières tentatives d'explication fusent alors : un pic de consommation, des énergies renouvelables défaillantes, un incendie vers Perpignan ou Narbonne, en France, une perturbation atmosphérique rare. Rien de tout cela n'est avéré. Le réseau espagnol a perdu 15 gigawatts de production en quelques secondes, s'avérant incapable de satisfaire 60 % de la consommation. L'opérateur de réseau espagnol REE a écarté le scénario de la cyberattaque. En fait, signale le mathématicien espagnol José Guillermo Sánchez León (université de Salamanque) dans *The Conversation*, aucun élément ne sortait de l'ordinaire au moment du *black-out*, tant sur le plan de la consommation que de la production d'électricité ou du mix énergétique. Et l'Aemet, l'équivalent de Météo-France en Espagne, ne signale aucun « *événement atmosphérique extrême* ».

Reconstituer l'enchaînement des événements

L'enquête a été confiée à l'ENTSO-E, l'organisme européen regroupant les gestionnaires d'électricité des pays membres de l'Union européenne. Mais le 17 juin, le gouvernement espagnol a rendu public un rapport faisant état d'une surtension ayant provoqué des déconnexions en cascade de sites de production. Une mauvaise programmation de leurs capacités par les entreprises énergétiques est pointée du doigt.

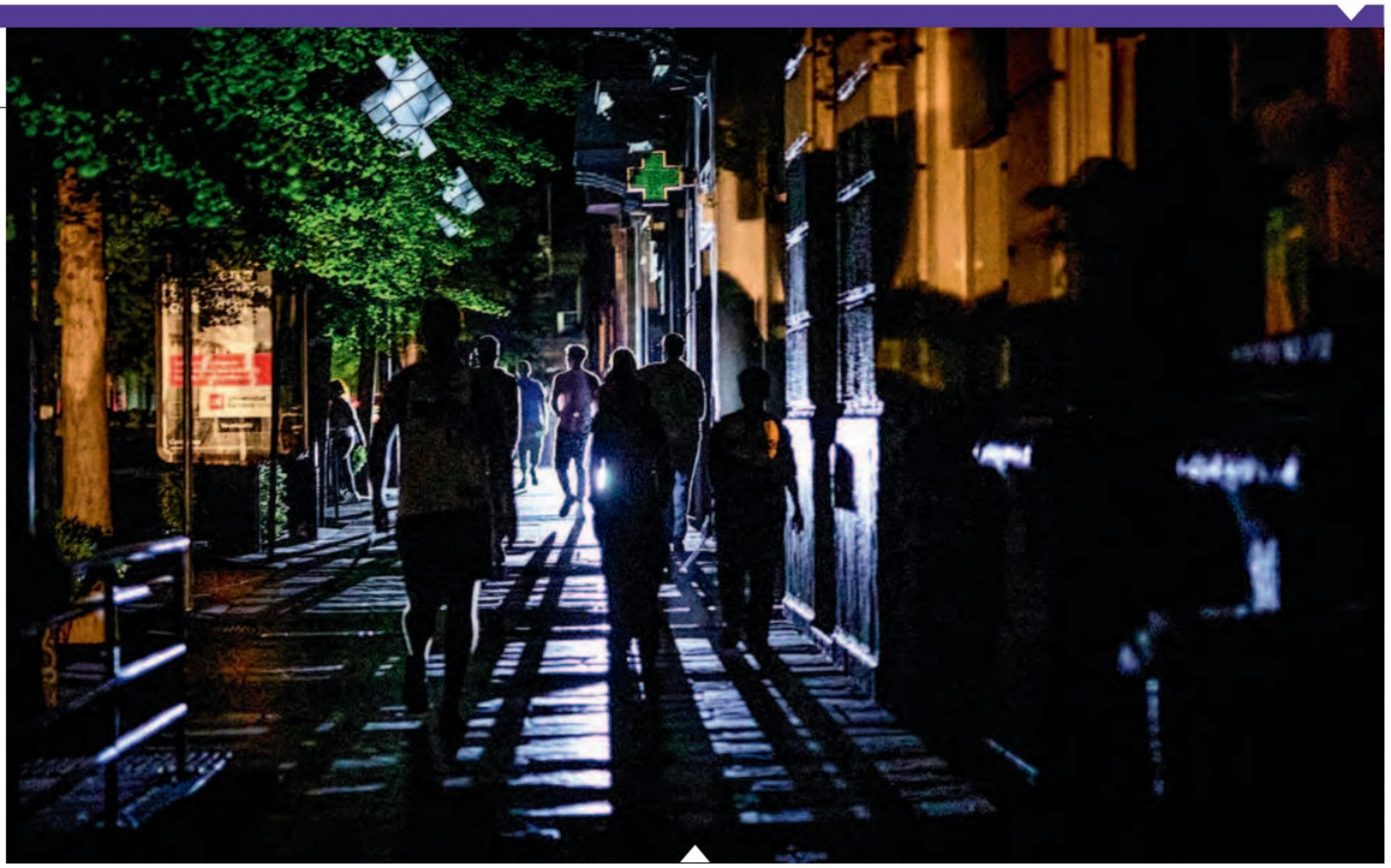
« *Enquêter sur une panne de réseau électrique ressemble beaucoup à un diagnostic médical,* estime Ali Mehrizi-Sani, professeur au Power & Energy Center de l'université Virginia Tech (États-Unis). *Les ingénieurs commencent par récupérer des données, comme les mesures de voltage et leurs angles de phase, les flux de puissance sur les lignes de transmission, les niveaux de génération d'électricité à différentes sources, les niveaux de consommation de différents récepteurs. Ils vont examiner le statut opérationnel de différents composants pour chercher, par exemple, s'il y a eu une panne ou une surintensité ayant déclenché un disjoncteur ou toute autre situation anormale.*»

Ces informations alimentent une chronologie et sont mises en regard de modélisations afin de remonter à l'événement déclencheur. Il faut

PRÉVENTION

Hiver 2022 : un cumul de facteurs de risque

À l'hiver 2022-2023, l'appel gouvernemental français à réduire la consommation électrique est un bon exemple de prévention de *black-out*. La guerre en Ukraine, déclenchée fin février, a certes compromis l'accès au gaz russe, mais s'y ajoutait une sécheresse ayant réduit les réserves d'eau des barrages hydroélectriques et à la mise hors service de la moitié du parc nucléaire pour maintenance. Difficile, aussi, de compter sur l'électricité des voisins européens, eux-mêmes devant gérer leur pénurie de gaz. Au final, l'appel à la sobriété s'est soldé par 10 % de consommation électrique en moins. Et pas de *black-out*.



FERMIN RODRIGUEZ / NURPHOTO / AFP

En quelques secondes le 28 avril, le réseau d'électricité espagnol a perdu 15 gigawatts de production, l'équivalent de 60 % de la demande du pays (ici à Grenade). Le Portugal et une partie du Pays basque français ont aussi été affectés par la panne générale.

aussi comprendre pourquoi les dispositifs de sécurité existants n'ont pas pu l'empêcher. « *Un système de réseau d'énergie étant dynamique, avec des niveaux de génération et de réception qui varient, des lignes et des composants qu'on active ou désactive, toutes ces recherches prennent souvent du temps et exigent d'envisager de multiples scénarios* », continue l'expert américain.
L'équipe américano-canadienne qui a enquêté sur le *black-out* du 14 août 2003 dans le nord-est des États-Unis a, par exemple, rendu son rapport final en avril de l'année suivante.
Pourtant, les *black-out* n'ont rien de méconnu. « *Ils sont largement documentés, analysés par la littérature scientifique, et les gestionnaires conçoivent leurs réseaux en ayant ce phénomène en tête, pour que le risque soit le plus faible possible, voire hautement improbable,* explique Frédéric Wurtz, directeur de recherche au CNRS affecté au Laboratoire de génie électrique de Grenoble (G2Elab) et codirecteur de la chaire Sobriété et résilience. *Mais le risque zéro n'existe pas, quel que soit le mix électrique. Car le réseau électrique est un système dans lequel s'empilent des couches techniques, humaines, sociales.* »
Les événements passés sont d'ailleurs une première source de renseignement. En France, la référence reste celui du 19 décembre 1978, à une époque où il n'y avait pas d'énergies renouvelables. Ces événements résultent, à chaque fois, de la combinaison d'un contexte et d'un incident déclencheur. En 1978, le contexte était celui du froid de décembre, un dernier mardi avant les vacances de Noël correspondant à une forte activité commerciale et industrielle. Donc à une forte consommation d'électricité. Là-dessus est survenue une panne sur une ligne en Meurthe-et-Moselle.

Recourir à des sources d'énergie décentralisées

C'est pour parer aux *black-out* que le réseau électrique est maillé : un point de livraison est desservi par plusieurs lignes, permettant à l'électricité d'emprunter des chemins différents si une ligne est hors service. « *Mais si c'est un moyen de production qui est défaillant, cela signifie que d'autres centrales doivent prendre en charge sa production,* souligne Frédéric Wurtz. *Or, si elles arrivent elles aussi en surcapacité, elles vont sauter à leur tour et, par effet domino, tout le réseau.* » Voire ceux des pays voisins, en particulier en Europe, où les réseaux nationaux sont interconnectés pour s'échanger de l'énergie. Fin avril, l'interconnexion entre l'Espagne et la France a donc été coupée pour éviter aux centrales françaises de subir une surcharge (le Maroc s'est également déconnecté). Le Pays basque français n'a ainsi connu qu'une panne de quelques minutes.
De fait, les *black-out* ne sont pas seulement des incidents : ils servent aux chercheurs et aux ingénieurs à mieux connaître un réseau et à améliorer sa résilience. « *Les pannes de 2003 dans le Nord-Est et le Midwest américain ont ainsi servi de catalyseurs au développement du concept de réseaux intelligents* », raconte Ali Mehrizi-Sani sur le site de Virginia Tech. Sans compter le recours à des sources d'énergie décentralisées, locales, avec panneaux solaires et batteries. Non pour les substituer au réseau traditionnel, mais pour éviter l'effet de sidération, le temps que la situation se rétablisse. ■

Arnaud Devillard

Quand la paille défie le béton

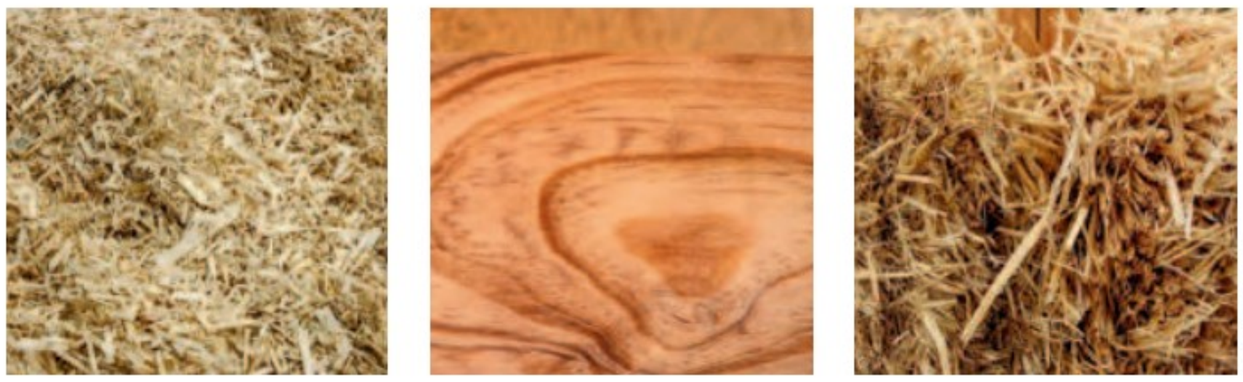
Les matériaux biosourcés — bois, chanvre, lin, paille — sont de plus en plus utilisés dans la construction. Leur capacité à stocker le carbone et leurs propriétés isolantes en font des concurrents sérieux des bétons, aciers et autres laines de verre.

Du bois, de la paille, de la terre crue, de la chaux, de la laine de bois : voilà les matériaux choisis par Langon, en Gironde, pour construire les 2400 m^2 de la future maison départementale des Solidarités. Exemple d'innovation, ce « laboratoire de la construction nouvelle génération » est loin d'être le premier bâtiment à intégrer des matériaux biosourcés. Le plus ancien construit en ossature bois et en isolation paille, la maison Feuillette, à Montargis dans le Loiret, date de… 1920 ! Mais les exemples de constructions faites de matériaux biosourcés se multiplient. Ainsi la résidence HLM Jules-Ferry, à Saint-Dié-des-Vosges, qui, en 2014, s'est imposée comme une référence européenne : avec ses huit niveaux, l'immeuble en bois et en paille est le plus haut jamais construit en France. En 2023, l'Hexagone comptait autour de 10 000 constructions isolées en paille, selon le Réseau français de construction en paille (RFCP). La même année, la part de marché de la construction en bois a atteint 7 % en Île-de-France et 6,2 % en moyenne sur le territoire national.

Pourquoi vouloir construire autrement ? Parce que, selon le rapport sur l'état mondial des bâtiments et de la construction publié en 2024, la construction et l'usage des bâtiments génèrent 37 % des émissions mondiales de CO_2, soit un peu moins de 10 gigatonnes. Le secteur a déjà été conduit à réduire fortement les émissions de carbone « opérationnelles » des bâtiments, soit les émissions provenant de l'usage des bâtiments (chauffage, éclairage, climatisation). Selon les projections du programme des Nations unies pour l'environnement, elles passeront de 75 % à 50 % des émissions totales du secteur d'ici à 2050.

En France, la Stratégie nationale bas carbone est très exigeante sur le sujet. L'empreinte de la chaîne de valeur bâtiment doit passer de 153 mégatonnes d'équivalent CO_2 ($MteqCO_2$) par an en 2019 à 96 $MteqCO_2$/an en 2030, puis à 16 $MteqCO_2$/an en 2050. C'est donc -89 % entre 2019 et 2050 ! Impossible sans agir sur la phase construction et les matériaux en particulier.

Béton, acier, laine de verre, laine de roche, polystyrène expansé ou encore isolants en polyuréthane nécessitent d'extraire des ressources naturelles non renouvelables (sable, pétrole…) et de l'énergie (extraction, transport, transformation, chaleur de fusion). Selon Info Cement, l'empreinte carbone du béton armé varie-



NATURIMAGES

Chanvre, bois, paille… Ces végétaux ont capté le CO_2 de l'air lors de la photosynthèse. Il reste séquestré quand ils sont utilisés dans la construction. Autres avantages : le bois est très structurant ; chanvre et paille offrent de bonnes propriétés d'isolation. Mais ces matériaux, sensibles aux remontées d'eau du sol, ne peuvent servir de fondations.

La paille, grâce à ses propriétés isolantes, offre un bilan carbone nettement meilleur que les matériaux conventionnels (construction d'une maison à La Voulte-sur-Rhône, en Ardèche, avec des bottes de paille et une ossature en bois).

XAVIER PAGES/NATURIMAGES

rait par exemple de 285 à 400 kg d'équivalent CO_2 par mètre cube. C'est pourquoi la recherche et les constructeurs se tournent de plus en plus vers les biosourcés.

« Ce sont tous les matériaux issus de la biomasse pour la construction, explique Laurent Arnaud, responsable du domaine bâtiment au Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) . *On les scinde en deux catégories : les matériaux légers de type fibres d'isolation, et ceux que l'on dit mortiers ou bétons de matières biosourcés, qui sont additionnées d'un liant particulier pour constituer des éléments d'enveloppe du bâtiment.* » Dans des villes européennes où 80 % du bâti de 2050 est déjà construit et où il faudra donc rénover ou surélever, les biosourcés *« ont un double intérêt : ils sont plus légers et utilisés en étage »*, relève Vincent Picandet, enseignant-chercheur à l'université Bretagne Sud.

Un impact réduit du bâtiment sur le changement climatique

Las, tous les experts, même les plus fervents promoteurs d'alternatives durables, sont d'accord : outre le bois, aucun autre matériau biosourcé ne concurrence à ce jour les propriétés structurantes du béton. *« On ne fera jamais d'ouvrage d'art très important avec des matériaux biosourcés, hors bois.* Idem *pour les fondations »*, estime Laurent Arnaud. Car, sauf à construire sur pilotis, en contact direct avec le sol, les matériaux végétaux, même le bois, sont exposés aux remontées capillaires.

Mais les biosourcés peuvent remplacer une large part des isolants de type laine de verre, laine de roche, polystyrène ou polyuréthane, ou fournir des cloisons intérieures, revêtements et isolations de façade. Les plus utilisés (bois, paille, chanvre, ouate de cellulose) répondent aux DTU (documents techniques unifiés) ou aux règles professionnelles et aux exigences de la garantie décennale qui attestent des qualités techniques des matériaux (réaction au feu, durabilité, résistance thermique…).

En France, la réglementation environnementale en vigueur depuis 2022 a ▸

ÉRIC CHAUVET / SAIF IMAGES

Projection d'un mortier de chaux-chanvre dans la paroi d'un bâtiment ancien afin d'augmenter ses propriétés isolantes.

introduit un nouvel indicateur, le coefficient IC Énergie, qui mesure l'impact sur le changement climatique du bâtiment sur tout son cycle de vie, de l'extraction des matériaux à la démolition. Il fixe des seuils de matériaux biosourcés à atteindre : ils passeront la barre des 100 kg de matériaux biosourcés utilisés par m² de surface plancher d'ici à 2028. Pour les spécialistes, recourir aux matériaux biosourcés a trois intérêts majeurs. Le premier et le plus appréciable vient de leur capacité à stocker le carbone. Le CO_2 de l'atmosphère est en effet capté par les végétaux lors de la photosynthèse et transformé en molécules comme la cellulose ou la lignine. On dit de ce carbone qu'il est biogénique car constitutif du végétal. Ainsi, même si la quantité moyenne de carbone stockée varie légèrement d'une plante à l'autre, elle constitue en moyenne 45 % de son poids à sec. Théoriquement, pendant toute la durée de vie d'un bâtiment, le CO_2 capté par la plante utilisée comme matériau sera séquestré.

Deuxième atout : *« les matériaux biosourcés sont aussi renouvelables,* souligne Vincent Picandet. *On peut considérer deux échelles. Celle du temps de l'arbre : il faut plusieurs décennies pour obtenir une forêt de chênes, un peu moins pour une forêt de pins ; et l'échelle des plantes issues de l'agriculture, dont le temps de renouvellement est annuel.* »

Enfin, ils ont l'intérêt de valoriser des ressources locales. Le paramètre transport est en effet fondamental dans l'empreinte carbone de l'environnement bâti. De plus, l'objectif des matériaux biosourcés est d'abord d'utiliser des coproduits agricoles. *« Ceux qui sont les plus matures en matière de recherche et de développement sont la chènevotte de chanvre et la paille de blé. Et dans ceux qui sont à l'étude en ce moment, on va trouver les résidus du tournesol (moelle et écorce), du maïs (moelle et écorce), de la lavande ou encore les balles de riz (coques qui entourent les grains de riz),* précise Thibaut Lecompte, enseignant-chercheur à l'université Bretagne Sud, spécialisé dans les analyses de cycle de vie des matériaux biosourcés. *Tous sont des résidus, parfois considérés comme des déchets ou sous-utilisés et donc peu valorisés alors qu'ils viennent avec les récoltes des plantes cultivées.* »

Le chanvre est un excellent exemple. Le chènevis de chanvre, la graine riche en oméga-3 est utilisée en cosmétique, pour l'alimentation animale et, dans une moindre mesure, pour l'alimentation humaine. Après extraction des fibres riches en cellulose et très résistantes, qui constituent le produit à principale valeur ajoutée de la paille, reste la chènevotte, particule « boisée » riche en lignine, qui peut être mélangée à un liant pour constituer du « béton de chanvre ». Il est principalement utilisé aujourd'hui pour l'exécution de parois verticales (murs, cloisons et doublages).

Les biosourcés régulent la température extérieure

L'intérêt des matériaux biosourcés se confirme pour leurs propriétés d'isolation. *« Ce sont des matériaux légers et poreux qui renferment une quantité d'air intéressant. L'air est un des meilleurs isolants et les matériaux biosourcés ont donc l'avantage d'être peu conducteurs thermiquement »*, explique Vincent Picandet. Ils demeurent néanmoins plus conducteurs que les isolants minéraux synthétiques conventionnels, ce qui oblige à adapter l'épaisseur pour obtenir la même résistance thermique. Par ailleurs, ils amortissent les variations de température extérieure et ralentissent la pénétration de la chaleur journalière l'été ou du froid nocturne l'hiver dans les intérieurs — on parle de déphasage.

BÂTIMENTS NEUFS

Un nouveau label français

En France, le premier label d'État « bâtiment biosourcé » a été mis en place en 2012 pour valoriser l'utilisation des matériaux biosourcés dans la construction neuve. Ce label reposait sur la masse de matériaux biosourcés par surface. Le ministère de la Transition écologique a décidé de le réviser afin de le mettre en cohérence avec la réglementation environnementale 2020 (RE2020). Il propose désormais trois niveaux d'exigence, définis selon la quantité de carbone biogénique stocké par unité de surface et par typologie de bâtiment. Ce nouveau label est entré en vigueur en septembre 2024.

« À résistance thermique égale, les fibres de bois offrent un déphasage d'environ 10 heures contre 5 heures environ pour une laine minérale, et l'amortissement est près de deux fois plus important », souligne Yves Hustache, délégué général de l'Association des industriels de la construction biosourcée.

Enfin, à l'exception du liège, matériau imputrescible et indéformable, les isolants biosourcés sont aussi plus perspirants, et permettent le transfert de vapeur d'eau à travers la paroi, tout en étant imperméables à l'air, comme le Gore-Tex. *« La plupart sont particulièrement hygroscopiques et permettent d'emmagasiner ou de restituer une quantité importante d'eau contenue sous forme de vapeur dans l'air. Ils peuvent donc à la fois réguler la température des cloisons (par changement de phase de l'eau) et l'humidité dans les pièces. Ce qui est fondamental dans une habitation car l'humidité relative amplifie la sensation de froid ou de chaud et joue donc sur le confort et les consommations d'énergie »*, ajoute Vincent Picandet.

Cela a notamment été mis en évidence dans le cas du béton de chanvre, dans lequel les transferts couplés de chaleur et d'humidité permettent de réduire de 20 kilowattheures (kWh)/m²/an le besoin en chauffage d'un bâtiment bien isolé, soit une économie annuelle de 500 euros pour un logement de 100 m² (au tarif de 0,25 euro le kWh).

Privilégier les matériaux locaux et peu transformés

Plus un matériau biosourcé sera local et peu transformé, plus faible sera son empreinte environnementale. La paille en bottes, les balles de riz pour isoler les planchers, la chènevotte de chanvre en vrac pour isoler les combles perdus ou encore le bois de structure ont donc un bilan carbone nettement meilleur que les matériaux conventionnels utilisés pour les mêmes usages. 1 m² d'isolant en laine de verre émet ainsi 4,2 kg de CO_2 sur tout son cycle de vie, dont 3,6 lors de la phase de production, alors que la même surface en bottes de paille d'une épaisseur de 37 cm, elle, a une contribution négative au changement climatique, -9,94 kg d'équivalent CO_2.

Mais, comme le rappelle l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), il ne faut pas prélever plus de 50 % des coproduits fibreux (chènevotte, paille…) sur chaque parcelle de terres cultivées, les résidus de culture offrant une couverture végétale importante pour protéger les sols du vent et favoriser la rétention d'eau. Il faudra *« travailler à développer une grande variété de matériaux biosourcés pour éviter une mainmise sur un même type de végétal »*, selon Sandrine Marceau chargée de recherche HDR à l'université Gustave-Eiffel.

« Reste à changer de paradigme, conclut Vincent Picandet. *Nous sommes encore ancrés dans le mythe des 3 petits cochons qui nous dit que la maison en briques est la plus solide, celle qui résiste, la plus durable donc. Mais c'est un mythe : les biosourcés sont souples et bien moins cassants que le béton. »* ■ **Fanny Costes**

VINCENT PICANDET

« Il faut changer de paradigme. Nous sommes ancrés dans le mythe des 3 petits cochons qui nous dit que la maison en briques est la plus solide »

Vincent Picandet, enseignant-chercheur à l'université Bretagne Sud

PROPRIÉTÉS

Géosourcés, biosourcés : quelles différences ?

Lorsqu'on parle de matériaux biosourcés, il n'est pas rare d'entendre parler de matériaux géosourcés également. Or, il est important de faire la différence entre ces matériaux car les seconds, bien que naturels aussi, n'ont pas les mêmes propriétés ni la même disponibilité. En effet, les matériaux géosourcés sont issus de ressources d'origine minérale telles que la terre crue, la pierre de roche ou le sable. Contrairement aux matériaux biosourcés, ils ne peuvent pas être considérés comme une ressource renouvelable. Les matériaux géosourcés ont néanmoins des propriétés structurantes plus intéressantes que les matériaux biosourcés (hors bois). Quand ils sont présents localement et peu transformés, ou quand ils sont récupérés d'un bâti ancien et réemployés, ils peuvent contribuer à la construction de bâtiments à très faible empreinte environnementale. Mais ce ne seront pas de sérieux candidats au remplacement du béton. *« Avec des propriétés mécaniques bien moindres que celui d'un béton hydraulique, leur coût global de mise en œuvre peine actuellement à faire concurrence à celui des matériaux traditionnels (bétons, parpaings…) et leur transport conduit irrémédiablement à accroître leur empreinte »*, explique Vincent Picandet.

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Le Web assiégé par les robots de l'IA

Avide de données pour ses algorithmes, l'industrie de l'intelligence artificielle opère une collecte en ligne frénétique, perturbant le fonctionnement des sites Internet. Avec Wikipédia comme victime emblématique.

C'est quasiment un cri d'alarme. Le 1er avril, la Fondation Wikimédia, l'organisme à but non lucratif qui promeut et développe les projets collaboratifs tels Wikipédia, WikiCommons ou Wiktionnaire, révélait en ligne combien l'industrie de l'intelligence artificielle perturbait le fonctionnement de ses sites. Les textes de Wikipédia et les 144 millions de fichiers multimédias de WikiCommons, en accès libre, sont en effet une manne de données pour les algorithmes d'OpenAI, Meta, Anthropic et consorts, qui envoient des logiciels automatisés, les *web crawlers*, collecter tous ces contenus. Résultat : *« Depuis janvier 2024, la bande passante utilisée pour le téléchargement de contenus multimédias a augmenté de 50 % »*, déclare la fondation. Or, si les contenus sont gratuits, ils impliquent une maintenance et une mise à niveau technique permanentes. *« La fondation Wikimédia dispose de ses propres* datacenters [centre de données] *à travers le monde pour ne pas avoir à recourir à des prestataires tiers,*

50 %

La hausse de bande passante utilisée pour le téléchargement de contenus multimédias stockés sur les serveurs de Wikipédia depuis janvier 2024.

et entretient sa propre infrastructure Web, conçue pour que les utilisateurs accèdent aux contenus avec une faible latence, détaille Elena Simperl, professeure d'informatique au King's College de Londres (Royaume-Uni). *Cela implique des frais en matière de gestion de serveurs, d'énergie, mais aussi de rémunération des équipes chargées de veiller au fonctionnement et à la sécurité de ces infrastructures.* »

LE MOT DU MOIS

Web crawler (robot d'exploration du Web)

Ce terme désigne un programme informatique qui parcourt automatiquement le Web. L'usage le plus connu est destiné aux moteurs de recherche et consiste à indexer des pages Web en suivant les liens qui s'y trouvent (robot d'indexation). D'autres *web crawlers* aident à la maintenance d'Internet (traquer les liens cassés) ou à l'archivage de sites. Il existe aussi des usages malveillants (collecte de courriels pour du spam, achat massif de billets de spectacle pour les revendre). Les robots de l'IA téléchargent tout ce qu'ils trouvent sur le Web : textes, images, sons, discussions, code informatique, revenant plusieurs fois sur les mêmes pages pour mettre à jour leurs données. Celles-ci alimentent l'entraînement des algorithmes d'apprentissage.

L'équivalent d'une attaque par déni de service

Lors des pics de trafic dus à des actualités fortes, par exemple, l'équipe ingénierie et fiabilité du site laisse des contenus prioritaires en « cache », optimise les connexions aux serveurs en fonction des zones géographiques des requêtes. Les *web crawlers* s'ajoutent à ces pics « humains » sans *« autres objectifs qu'extraire des données,* poursuit Elena Simperl. *Ils naviguent de manière autonome sur les sites en suivant les liens pour accéder au plus grand nombre possible de pages. Cela génère un fort trafic, de manière irrégulière, qui peut devenir envahissant et lourd financièrement.* »

Le problème est plus général, comme en ont témoigné nombre d'utilisateurs du Web, notamment les communautés *open source* pour qui l'impact financier est difficile à tenir. Ingénieur chez Mozilla, Dennis Schubert relevait en décembre 2024 que 70 % des requêtes sur son serveur Diaspora (un réseau social décentralisé) venaient de *web crawlers,* ceux d'OpenAI seuls comptant pour 24,6 %. *« C'est littéralement une attaque par déni de service de l'ensemble d'Internet »*, estime-t-il. En mars, un billet de blog désemparé du développeur Drew DeVault évoquait des *« dizaines de petites pannes par semaine »* sur sa plateforme SourceHut. Le 19 mars, sur la plateforme GitLab, la communauté *open source* KDE a été inaccessible à cause d'un *web crawler* du géant chinois Alibaba.

Pour amoindrir le choc, la Fondation Wikimédia propose une version de Wikipédia (anglophone et francophone) structurée comme un jeu d'entraînement pour IA : 113,58 gigaoctets sont ainsi mis à disposition des *web crawlers* sur la plateforme Kaggle. Une manière de détourner les bots du site lui-même.

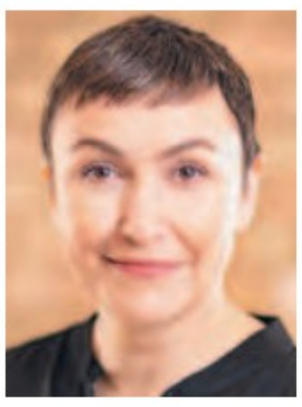
D'autres réactions sont plus radicales. Comme le blocage de tous les bots, sachant que cela peut être dommageable pour Internet, ou le fait d'imposer une « preuve de travail » aux connexions qui arrivent sur un serveur, c'est-à-dire un calcul permettant de distinguer les demandes légitimes des autres requêtes. Au risque de ralentir l'accès des premières.

Un développeur s'est quant à lui inspiré des techniques antispam : il attire les *web crawlers* vers des pages remplies de faux contenus et de charabia, d'où l'absence de liens les empêche durant un temps de sortir. Le prestataire de services Internet Cloudflare propose à ses clients une option du même genre, quoique moins agressive, AI Labyrinth. Il s'agit de pages elles-mêmes générées par IA, sans inexactitudes mais inutiles car sans rapport avec le site protégé. Les bots y gaspillent leur temps et leurs ressources, tandis que les internautes et les *web crawlers* légitimes n'y ont, eux, pas accès. ■

Arnaud Devillard

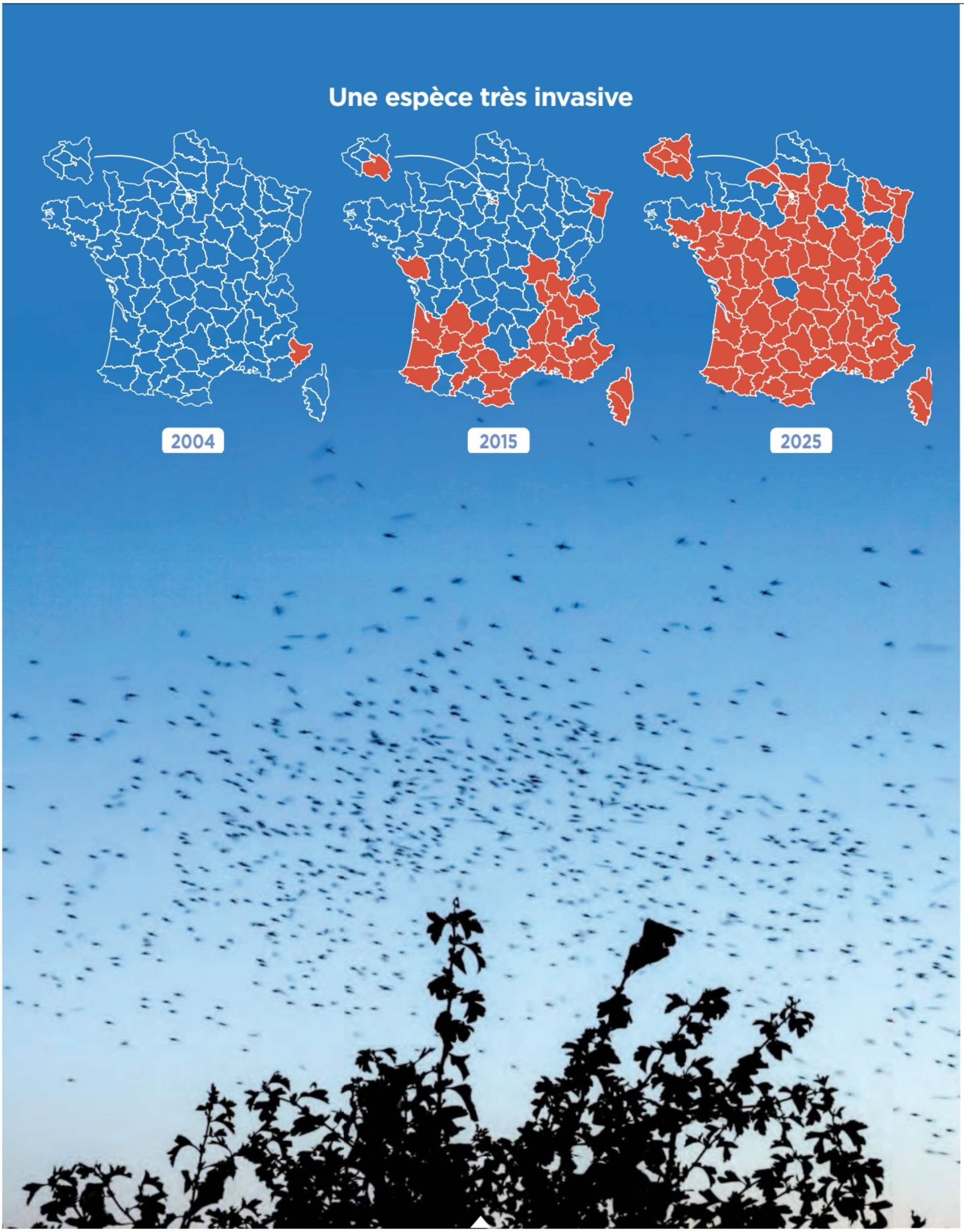
POUR EN SAVOIR PLUS

Le communiqué de la Fondation Wikimédia sur l'impact des « web crawlers » :
sciav.fr/941wiki



KING'S COLLEGE DE LONDRES

> **“ Les « web crawlers » génèrent un fort trafic, de manière irrégulière, qui peut devenir envahissant et lourd financièrement ”**
>
> **Elena Simperl,** professeure en informatique au King's College de Londres (Royaume-Uni)



QUYÍNNGO-DINH-PHU/NATURIMAGES ; INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ

« Aedes albopictus » s'est implanté en deux décennies sur la quasi-totalité du territoire hexagonal, après avoir débarqué pour la première fois en 2004 au port de Menton, à l'occasion d'un commerce illégal de pneus usagés.

Moustique-tigre

L'été de tous les dangers

En vingt ans, il a colonisé la majorité de la France métropolitaine. Cet insecte invasif peut être vecteur de maladies tropicales : dengue, zika… Et l'épidémie de chikungunya en cours à La Réunion fait craindre pour cet été une flambée des cas dans l'Hexagone. La technique de stérilisation des mâles se développe pour tenter de limiter les populations de moustique-tigre.

Par Estelle Dautry

Ce n'est pas un grand voyageur. Le moustique-tigre, rayé, qui se distingue par son trait blanc sur la tête et le haut de l'abdomen, se déplace en vol sur un périmètre de 150 mètres uniquement. Et pourtant, en vingt ans, il a colonisé la majorité de la France hexagonale. L'insecte a débarqué à Menton (Alpes-Maritimes) en 2004. Son arrivée s'est faite par bateau, dans le cadre d'un commerce illégal de pneus usagés. *« Ceux-ci ont fait office de gîtes larvaires. C'est ce que cherchent les femelles : un abri de couleur sombre contenant un peu d'eau stagnante »*, décrit Claire Valiente Moro, enseignante-chercheuse à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Depuis, *Aedes albopictus* utilise les moyens de transport terrestres — camions, voitures — et les axes autoroutiers pour s'implanter dans de nouveaux territoires. Il est aujourd'hui présent dans 81 départements. Mais cette année pourrait avoir lieu la première épidémie de chikungunya, la maladie de l'homme courbé, une maladie infectieuse provoquée par un virus transmis par le moustique-tigre.

Comment en est-on arrivé là ? Le moustique-tigre a avant tout fait preuve d'une capacité d'adaptation exemplaire. *« Cette espèce originaire des environnements selvatiques, forestiers, d'Asie du Sud et de l'Est, a démontré une plasticité écologique remarquable.* ▸

CORINNE ROZOTTE POUR SCIENCES ET AVENIR

Elle a su s'acclimater très rapidement à des environnements où d'autres espèces auraient peut-être moins de chance de survivre et proliférer », observe Claire Valiente Moro. Son point fort ? Sa faculté à entrer en diapause : une sorte d'hibernation de ses œufs de la fin de l'automne au début du printemps qui lui permet de survivre à nos hivers vigoureux — une adaptation développée en Europe et aux États-Unis. Les œufs se mettent en dormance et ont un stock de lipides qui les aident à passer l'hiver. Au printemps, plusieurs conditions doivent être réunies pour sortir de cet état : une température assez élevée, une durée du jour suffisante et la présence d'eau. Cela se produit généralement autour du mois d'avril dans le sud de la France.

Une préférence marquée pour le sang humain

« Pendant la période de diapause, les larves sont imperméables à tout. Aucun insecticide n'est efficace. Il est possible de vider les gîtes larvaires mais encore faut-il pouvoir les localiser », indique Frédéric Simard, directeur de l'unité de recherche Maladies infectieuses et vecteurs, écologie, génétique, évolution et contrôle (Mivegec), à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), à Montpellier. Les gîtes larvaires privilégiés par le moustique-tigre sont les boîtiers téléphoniques, les avaloirs, les terrasses sur plots, les pots de fleurs… Même une coquille d'escargot vide peut suffire ! Il faut savoir qu'une femelle pond 200 œufs en moyenne et qu'elle va pondre cinq fois au cours de ses six semaines de vie. Cela peut représenter un millier de larves. « Aedes albopictus *s'adapte très vite. Les évolutions se font de génération en génération ; en une année, ils font une dizaine de générations, en 30 ans c'est 300 générations. Ils s'adaptent très bien au réchauffement climatique* », appuie Frédéric Simard.

200
le nombre d'œufs par ponte.

150 mètres
le périmètre au sein duquel se déplace le moustique-tigre.

50
le nombre de virus que pourrait transmettre le moustique-tigre.

La présence de l'insecte sur le territoire est surveillée notamment grâce à des pièges. Comme chez tous les moustiques, seules les femelles piquent. C'est donc pour les attirer que ces pièges ont été conçus. Il en existe deux types, les pondoirs et les olfactifs. Les premiers sont des boîtes noires contenant un peu d'eau au sein de laquelle la femelle va être attirée et d'où elle ne pourra pas repartir. Si elle pond, les larves se retrouvent dans un insecticide. Les pièges olfactifs, eux, sont dirigés vers les insectes qui cherchent un repas de sang, un hôte à piquer. Ils dégagent des molécules mimant l'odeur corporelle, en particulier de l'acide lactique typique de la transpiration, et émettent du CO_2 pour imiter notre respiration. *« Nous travaillons avec des entreprises sur le développement de pièges intelligents, qui peuvent identifier les moustiques et les compter. L'identification se fait avec l'aide de l'intelligence artificielle, entraînée sur des images ou sur des sons* », précise Frédéric Simard, qui est aussi le président du groupe de travail vecteur de l'Anses, l'Agence nationale de sécurité sanitaire. Actuellement, en France métropolitaine, la surveillance se fait du 1er mai au 1er novembre. Mais lorsque l'invasion commence, les pièges seuls ne suffisent pas à la contenir. Il faut les associer à une « lutte mécanique », qui passe notamment par l'élimination de tous les petits points d'eau stagnante dans l'espace public comme chez les particuliers. *« Nous avons constaté jusqu'à 70 % de réduction effective du nombre de moustiques en combinant des pièges*

Le piège olfactif dégage des molécules mimant la respiration et l'odeur de la peau humaines qui attirent les femelles moustiques-tigres. Celles-ci se retrouvent alors aspirées dans le dispositif. Ici, dans le cadre d'un projet de recherche de l'IRD, ces pièges sont placés dans différents lieux de la commune de Grabels, dans l'Hérault.

et l'élimination des gîtes larvaires par les particuliers », insiste Grégory L'Ambert, entomologiste médical à l'EID Méditerranée (Entente interdépartementale pour la démoustication du littoral méditerranéen), qui a mené le projet Vectrap près de Montpellier.

Si la situation actuelle préoccupe les scientifiques, c'est que le moustique-tigre est une espèce invasive : il va prendre le dessus sur les autres espèces présentes. Le cas français n'est pas inédit, puisqu'il est arrivé la même chose dans certains territoires en Afrique. *« Le moustique-tigre a déjà supplanté d'autres moustiques,* Aedes aegypti *notamment* », décrit Claire Valiente Moro. Ce qui n'est pas sans conséquence car *Aedes albopictus* est anthropophile : la femelle préférera toujours le sang humain, alors que *Culex*, le moustique commun, pique aussi piquer les oiseaux ou les rongeurs. D'où l'impression que le tigre pique plus que les autres.

Sur la terrasse extérieure de l'IRD à Montpellier, Frédéric Simard guette l'insecte. *« Il y a une croyance selon laquelle c'est un moustique qui pique le jour et à l'extérieur. Mais on observe qu'en vivant avec les fenêtres ouvertes au printemps et en été, cela ne le dérange pas de venir piquer à l'intérieur et de sortir ensuite se reposer. Ce sont des informations qui vont modifier les méthodes de lutte et qui ne seront pas les mêmes que sous les tropiques où le moustique est présent toute l'année* », détaille le chercheur.

Comment limiter les populations de moustiques chez nous ? *« Ce que nous défendons ici, c'est la technique de l'insecte stérile. Elle consiste à stériliser des mâles, puis les relâcher dans la nature. Les femelles moustiques ne s'accouplent qu'une seule fois dans leur vie et elles ont ce qu'on appelle des spermathèques, où elles vont emmagasiner tout le sperme qu'elles reçoivent lors de l'accouplement. Donc si cette spermathèque est remplacée par des spermatozoïdes non viables, la femelle continuera à pondre, mais les œufs ne seront jamais fécondés* », explique Frédéric Simard.

Une première expérimentation a eu lieu en mai dernier à Brive-la-Gaillarde, par une start-up de biotechnologie, Terratis, basée à Montpellier. Problème, un flou juridique entoure encore cette pratique. *« Un moustique stérile n'est ni un insecticide, ni une molécule chimique, donc il n'est pas encadré réglementairement. Nous ne savons pas faire de biocontrôle dans le domaine de la santé alors qu'on sait le faire en agriculture. Il faut que cela évolue* », insiste Frédéric Simard. Il existe aujourd'hui une cinquantaine de projets dans le monde avec la technique de l'insecte stérile.

Il peut être vecteur d'une cinquantaine de virus

Le problème majeur du moustique-tigre reste sa capacité à être vecteur de maladies. *« Ce moustique transmet plusieurs arbovirus : la dengue, le chikungunya, la fièvre jaune, Zika… Ce dernier circulait déjà en Afrique avant l'épidémie de 2015 en Amérique du Sud et aux Antilles. D'autres virus peuvent émerger du jour au lendemain. Donc en luttant contre ces moustiques-là, on lutte contre ces 50 virus* », assure Frédéric Simard. Que peut-on faire pour stopper la transmission de ces maladies ? *« L'une des méthodes consiste à infecter les populations de moustiques par une bactérie nommée* Wolbachia. *La bactérie interagit avec l'insecte et le rend incapable de transmettre le virus. C'est une stratégie qui a fait ses preuves en zone*

VÉGÉTALISATION

Le retour de la nature en ville

La tendance au retour de la nature en ville peut-elle favoriser la présence du moustique-tigre ? *« La végétalisation des villes est absolument nécessaire, mais elle doit se faire sans amplifier le risque de transmission vectorielle*, plaide Frédéric Simard, directeur de recherche à l'IRD de Montpellier. *Le moustique-tigre ne vit pas que de sang. Il se nourrit également de pollens et de sucre qu'il prend sur les fleurs. Il faut réfléchir à l'implantation de nos parcs, et peut-être avoir plus de petits jardins. Le moustique-tigre se déplaçant sur des petites distances, il ne circulerait pas d'un jardin à l'autre. »* Mais la végétation peut aussi permettre de ramener en ville des prédateurs de moustiques qui n'existent plus : des pigeons, des moineaux, qui avaient arrêté depuis longtemps de chasser les moustiques.

intertropicale, décrit le chercheur. *La recherche travaille également sur des vaccins anti-transmission. Destinés à l'humain, ils empêchent les moustiques de transmettre la maladie.* »

Un seul biocide autorisé, mais dont la toxicité pose question

Dans son bureau de Montpellier, Grégory L'Ambert coordonne les interventions de lutte anti-vectorielle pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (Paca). Quand la présence du moustique est signalée à un endroit, il reçoit des alertes sur la plateforme SI-LAV, un système d'information développé au ministère de la Santé. Chaque alerte déclenche une enquête de terrain. *« Nous appelons la personne qui a fait le signalement pour avoir son adresse, et se rendre dans son jardin — si possible avec elle —, constater ou non la présence de moustiques-tigres,* raconte le spécialiste. *Puis l'on se rend chez tous les voisins dans une zone de 150 mètres. Dès qu'on identifie un moustique, on réalise au plus vite un traitement qui vise à tous les éliminer. Le traitement n'a pas vocation à rester actif dans le temps. Et s'il n'y a pas de vecteur, nous n'utilisons pas de biocide à titre préventif.* » L'enquête se poursuit en vérifiant si la zone abrite des établissements particuliers — crèches, écoles, ruches ou exploitations agricoles bio. Auquel cas la mairie est avertie et des flyers « Attention traitement moustiques » sont distribués dans les boîtes aux lettres avant l'intervention qui se fait de nuit, vers 4 heures du matin.

CORINNE ROZOTTE

« Outre la technique de la stérilisation, la recherche travaille sur des vaccins anti-transmission destinés à l'humain »

Frédéric Simard, directeur de recherche à l'IRD de Montpellier

Dans cette lutte contre les *Aedes albopictus* adultes, un seul biocide est aujourd'hui autorisé : la deltaméthrine, qui appartient à la famille des pyréthrinoïdes. Un produit efficace mais qui pose question. Dans un rapport publié le 24 avril, l'Anses alerte sur les risques liés à l'exposition à ce produit. En effet, la molécule est associée à un risque accru de leucémie lymphoïde chronique et de lymphome lymphocytaire en lien avec une exposition professionnelle, ainsi que des effets néfastes sur le neurodéveloppement des très jeunes enfants à la suite d'une exposition durant la grossesse.

L'an dernier, sur le territoire, chaque foyer de dengue signalé a été contenu à moins de 20 cas. À Fano, en Italie, où les interventions ont été retardées, 199 cas de dengue autochtones ont été recensés entre août et octobre 2024. Cependant tous les regards se tournent vers une autre maladie infectieuse : l'épidémie de chikungunya en cours à La Réunion fait craindre une flambée des cas dans l'Hexagone pour cet été. *« Le risque est surtout devant nous,* prévient Grégory L'Ambert. *En Île-de-France, il y a beaucoup de voyageurs mais encore peu de moustiques. En revanche, en Paca, toutes les conditions sont réunies pour qu'il y ait de nombreux cas. Dans un scénario pessimiste, nous aurons du chikungunya à partir du mois de juillet. Paca étant une région touristique, cela risque de renvoyer des gens touchés par la maladie dans toute la France.* » Le premier cas autochtone détecté dans le Var dès le 11 juin a donné l'alerte. ■

ÉPIDÉMIOLOGIE

Un risque de flambée des cas de chikungunya

Dengue, chikungunya, Zika, fièvre jaune… *« Le moustique-tigre transmet une cinquantaine d'arbovirus potentiellement pathogènes pour l'humain* », alerte Frédéric Simard, directeur de recherche à l'IRD de Montpellier. En métropole, ces maladies ne sont pas endémiques : jusqu'à présent elles ont toujours été rapportées par un voyageur. Ainsi, entre le 1er mai et le 3 juin, 283 cas importés de dengue ont été recensés et 424 cas de chikungunya, selon Santé publique France. À cette date, toujours aucun cas autochtone. En avril 2024, l'Anses estimait à 6 ou 7 (sur une échelle de 9) la probabilité d'une épidémie transmise par le moustique-tigre, dans les cinq prochaines années. Alors que l'on y craignait plutôt une épidémie de dengue, l'épidémie de chikungunya a lieu à La Réunion depuis août 2024. Elle fait craindre une flambée des cas dans l'Hexagone cet été. Avec l'arrivée de l'hiver austral, la circulation du virus sur l'île est aujourd'hui en phase de décroissance, mais 160 000 personnes ont été atteintes par l'arbovirus, et 20 en sont décédées. Le chikungunya provoque d'intenses douleurs articulaires et une forte fièvre. Un premier vaccin avait obtenu une autorisation, mais les plus de 65 ans en ont finalement été exclus fin avril après la découverte d'effets indésirables graves.

L'origine énigmatique des séismes de Santorin

Santorin a connu le 26 janvier une série de secousses, obligeant les autorités à bloquer certains accès (ici le 5 février).

L'épisode d'activité sismique observé dans les Cyclades en début d'année a surpris par son intensité exceptionnelle. Une expédition océanographique a collecté des données pour tenter de comprendre le phénomène.

Le calme est revenu sur les Cyclades. Mais la saison touristique a démarré avec un recul des réservations. Si les locaux sont habitués à l'activité sismique de la région, les voyageurs n'ont pas oublié que dans les quatre semaines qui ont suivi la nuit du 26 janvier, plus de 20 000 séismes ont été enregistrés au large d'Amorgos et de Santorin, deux îles de l'archipel. Les plus forts avaient atteint une magnitude de 5,3 dans la nuit du 10 au 11 février, sans faire de dégâts. Bien que les épicentres aient été localisés en pleine mer, loin des lieux de vie, la multitude de secousses ressenties à Santorin et Amorgos avait poussé près de 11 000 personnes à quitter les lieux. *« Ce sont des îles volcaniques, nous avons environ 25 000 séismes par an, mais ce qui était étonnant ici c'était la fréquence : il y avait des secousses toutes les dix minutes,* se rappelle Paraskevi Nomikou, géologue grecque qui a participé à la gestion de la crise auprès du gouvernement local. *C'était pénible pour se déplacer et pour les travailleurs saisonniers, ça peut faire peur. »*

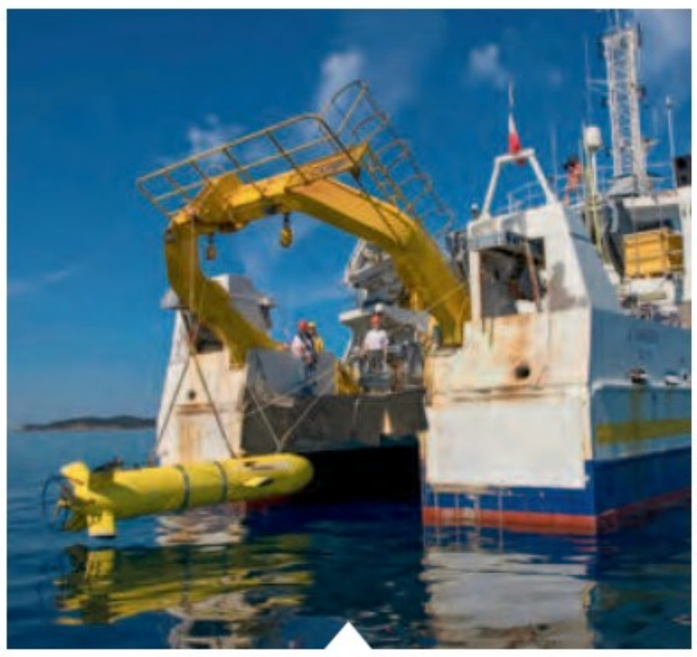
À ce jour, l'origine de ces secousses reste incertaine. À bord de *L'Europe*, Frédérique Leclerc, enseignante-chercheuse au laboratoire GéoAzur de l'université Côte d'Azur, et son équipe ont réalisé au printemps une campagne en mer inédite durant cinq jours. Le navire côtier de la flotte océanique française, opéré par l'Ifremer et amarré dans le port d'Héraklion, en Crète (Grèce), a parcouru l'ensemble de la zone de la crise sismique au large des Cyclades. *« Nous sommes partis avec trois questions,* détaille la chercheuse. *Y a-t-il une activité volcanique nouvelle au fond de la mer ? Quel a été le rôle des failles connues dans la zone ? Ont-elles glissé ou ont-elles laissé s'échapper des fluides (magma ou gaz associé au magma) ? »*

Le phénomène, qualifié d'essaim sismique, a été d'une intensité exceptionnelle dans cette région régulièrement secouée de séismes de faible magnitude. *« En général, quand survient une crise sismique d'origine tectonique* [liée aux mouvements des plaques]*, il y a un premier séisme et ensuite des répliques*

JOHN LIAKOS / ANADOLU / AFP

moins fortes. Là, le schéma était différent », explique Frédérique Leclerc. Pour les chercheurs grecs et internationaux, l'origine de cette sismicité serait alors magmatique. Or, les volcans sous-marins de la région n'ont montré aucun signe d'activité. Ce qui justifie l'expédition en mer à la recherche d'indices dans le fond marin. Sur le pont de *L'Europe*, l'équipage a commencé par effectuer les tests de mise à l'eau du sous-marin AsterX, en forme de torpille jaune. Cet engin automatique de moins de cinq mètres de long plonge jusqu'à 2850 mètres pour sonder le plancher océanique.

Équipé d'un sondeur multifaisceaux, un appareil programmé pour cartographier le fond marin à très haute résolution, AsterX se positionne à 70 m au-dessus du fond de la mer. Il émet une onde acoustique qui se propage dans l'eau, se réfléchit sur le fond marin et repart vers une antenne de réception. Il enregistre alors le temps que met l'onde acoustique à parcourir l'aller-retour.



O. DUGORNAY/ IFREMER

Le sous-marin AsterX, en forme de torpille jaune, sonde et cartographie le fond marin.

Connaissant la vitesse de propagation des ondes dans l'eau, il est possible d'en déduire la profondeur du fond marin. Situé sous la coque du navire, un deuxième sondeur, plus large mais moins précis, balaye le fond à mesure que le navire se déplace. Les données recueillies par ces deux appareils permettent de calculer la profondeur du fond de la mer, aussi appelée bathymétrie, sur la zone épicentrale de la crise sismique. Au fil des heures de navigation, ce relief mystérieux se dessine sous les sondeurs. La mesure bathymétrique sert ensuite à établir des cartes numériques représentant en 3D la topographie du fond marin. *« Avec la précision du sondeur d'AsterX, on voit nettement les reliefs et les failles, c'est comme mettre des lunettes ! »*, se réjouit Frédérique Leclerc. Une fois ces données traitées et analysées par les équipes grecque et française, les scientifiques pourront mettre en lumière d'éventuels déplacements de ces failles ou des glissements de terrain faisant suite aux séismes. *« Les mesures de 2024 montrent que le séisme de 1956 a provoqué un déplacement du fond marin de 9 à 16 mètres,* ajoute la chercheuse. *On ne s'attend pas à autant ici. »*

Des bulles de gaz, possibles témoins de l'activité volcanique

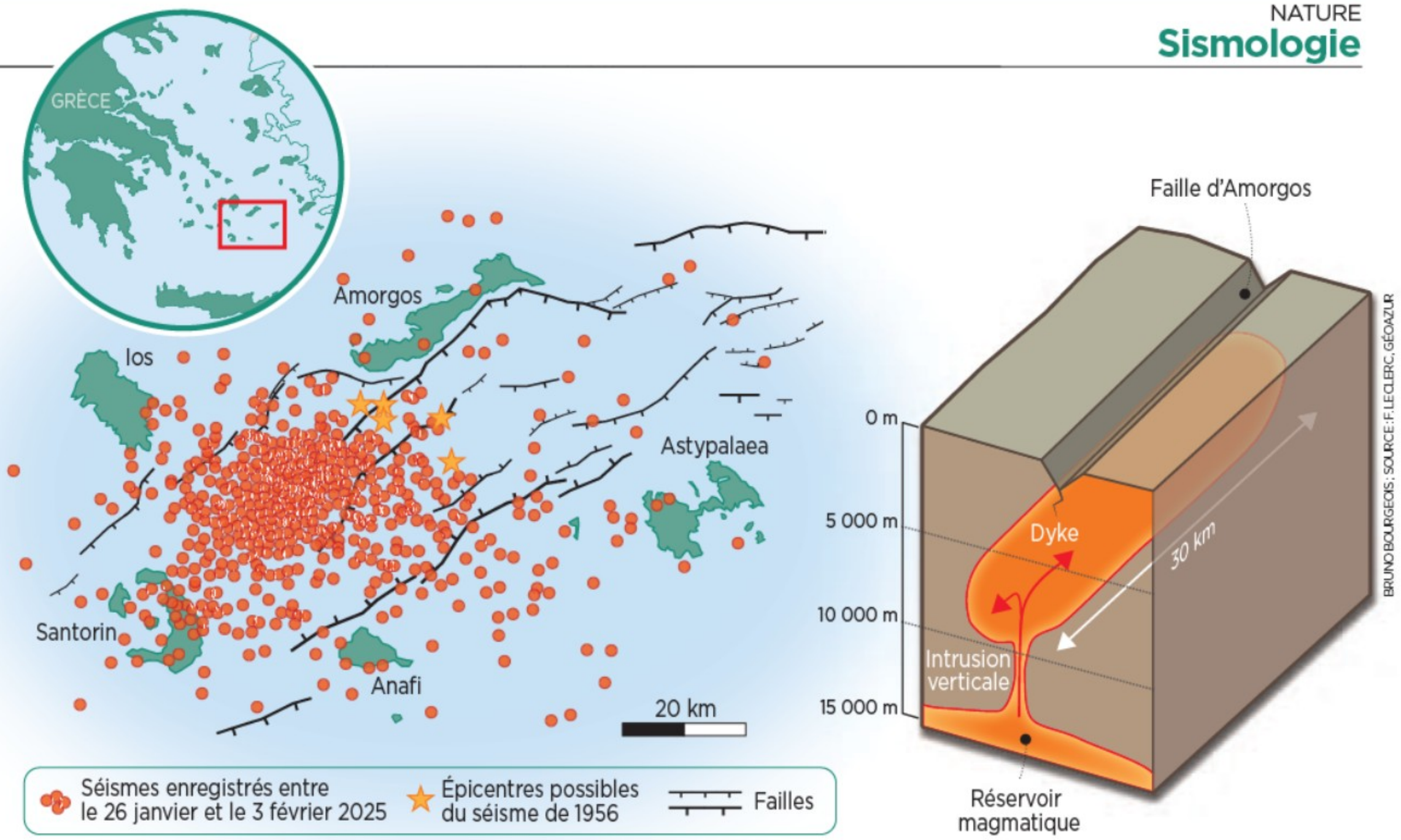
Mais les données sont parfois difficiles à interpréter, car pendant sa propagation, l'onde acoustique peut aussi se réfléchir partiellement sur des panaches de bulles de gaz, ou être déviée par des bancs de poissons. *« Ici, on a un doute »*, s'arrête la chercheuse. Sur l'image, elle pointe la « flamme » caractéristique d'une sortie de fluide, également appelée panache. *« Lorsqu'on observe des petits points qui remontent du fond de la mer vers la surface en forme de panache, c'est potentiellement synonyme de bulles qui émanent du fond de la mer et remontent vers la surface »*, explique-t-elle. Mais en modifiant quelques paramètres d'affichage des données, le panache ne s'enracine plus sur le fond marin : *« Cela pourrait être en réalité un banc de poissons, on a plusieurs coupes comme ça qu'il faudra analyser pour pouvoir trancher. »*

Ce point est important car les bulles peuvent être des témoins d'une activité volcanique. *« On voit des énormes panaches de bulles au-dessus des volcans sous-marins actifs, comme à Mayotte,* décrit Frédérique Leclerc. *Mais rien de semblable ici. »* Les bulles possiblement

TECTONIQUE

Un archipel sous haute surveillance

Situé dans la mer Égée, l'archipel des Cyclades, au large de la Grèce, résulte de la convergence des plaques tectoniques africaine, eurasienne et anatolienne, dont les mouvements induisent une activité sismique et volcanique importante. Santorin est une île volcanique ayant notamment produit une impressionnante éruption vers 1610 avant notre ère. Le Kolumbo, volcan actif sous-marin situé au nord-est de l'île, est lui-même entré en éruption quelques années plus tard. Le 9 juillet 1956, un séisme de magnitude 7,7 frappe l'île d'Amorgos. Il génère un tsunami dont les hauteurs de vagues ont pu dépasser 20 m, faisant 53 morts et une centaine de blessés. Depuis, la région est sous haute surveillance internationale. Et pour cause, entre 2011 et 2012, des mouvements de magma en profondeur, résultats de l'extension de la plaque eurasienne, avaient entraîné un gonflement de la zone sans aboutir à une activité volcanique en surface. Le 13 mai 2025, peu après la crise de Santorin, un séisme de magnitude 6,1 a frappé l'archipel du Dodécanèse, au large de l'île de Kassos, sans faire de dégâts. Ce dernier, sans réplique ni lien avec l'essaim sismique précédent, témoigne d'une activité constante de la région.



L'hypothèse d'une intrusion magmatique sous la croûte terrestre (« dyke ») pourrait expliquer la série de secousses. Le magma, coincé à des kilomètres de profondeur, s'accumule et crée une pression pour se frayer un passage, fracturant ainsi la roche.

détectées par les sondeurs pourraient être la conséquence d'un autre phénomène. À proximité des failles, l'expulsion de fluides ou gaz magmatiques peut former des trous dans les sédiments qui recouvrent le fond de la mer — des « pockmarks » dans le langage des chercheurs — signes d'une activité tectonique récente ou d'un glissement de terrain sous-marin. Mais, là aussi, la scientifique reste prudente : « *La formation de potentiels* pockmarks *peut être antérieure à la crise sismique de janvier-février. Il faudra analyser toutes les données conjointement, et en détail pour réussir à trancher.* »

Une fois les données traitées, nettoyées, elle pourra les comparer à celles des années précédentes. « *J'aimerais voir si la forme du fond de la mer a changé, si les* pockmarks *ont grandi ou si les failles ont glissé, même de quelques centimètres* », ajoute-t-elle.

La crise sismique serait terminée, selon les chercheurs

Mais une idée émerge au sein la communauté scientifique. La crise ne serait pas liée à un glissement le long des failles, ni à un soudain réveil volcanique. Selon l'hypothèse principale, elle résulterait de la propagation d'un « dyke », c'est-à-dire d'une intrusion magmatique dans la croûte terrestre. Sous l'archipel localisé à l'aplomb d'une faille dans la plaque eurasienne, le magma s'accumule et stagne dans différents réservoirs profonds. De temps à autre, ce liquide chaud et moins dense que les roches qui l'entourent migre naturellement vers la surface. Pour cela, il doit s'infiltrer dans des fissures et des failles existantes qui s'ouvrent sous la pression et laissent le magma remonter. Mais parfois, il n'y a pas de fissures, et le magma se retrouve coincé à plusieurs kilomètres de profondeur. « *Il s'accumule et la pression augmente localement, cassant et fracturant la roche environnante pour se créer un passage* », décrit Frédérique Leclerc. Un cheminement difficile du magma en profondeur qui aurait généré une grande partie de la succession de séismes de magnitude moyenne ayant secoué l'archipel. La fréquence entre les séismes étant aujourd'hui affaiblie, les chercheurs considèrent le *dyke*, et donc la crise comme terminés. « *Quelques secousses sporadiques peuvent encore se produire, mais il faut laisser à la Terre le temps de s'apaiser* », conclut Paraskevi Nomikou. ■

Enola Tissandié,
envoyée spéciale à Héraklion

F. LECLERC

« J'aimerais voir si la forme du fond de la mer a changé, si les pockmarks [trous dans les sédiments] ont grandi ou si les failles ont glissé »

Frédérique Leclerc, enseignante-chercheuse au laboratoire GéoAzur de l'université Côte d'Azur

STADE PHÉNOLOGIQUE Phase de développement d'une plante (germination, croissance des organes de reproduction, floraison, maturation des fruits ou des graines).

POINT DE ROSÉE Température à partir de laquelle la rosée survient. Elle dépend de la température de l'air et de son taux d'humidité.

ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP) Maximum d'eau (en mm) que peut évaporer le sol et transpirer la plante à condition que le sol soit pourvu en eau et que les plantes couvrent uniformément le sol.

La météo agricole, l'outil clé des récoltes

Une dizaine de plateformes et d'applications d'agrométéorologie fournissent aux agriculteurs des informations indispensables pour intervenir sur les cultures : pulvérisation, protection contre le gel, irrigation, récolte… Certains modèles diffusent même des prévisions adaptées aux différentes plantations, comme la vigne ou les céréales.

Pour les vacanciers, la météo estivale c'est la promesse de voir un grand soleil avec des températures clémentes. Pour l'agriculteur, elle est bien plus qu'un simple bulletin : c'est une information déterminante pour lancer les récoltes, ajuster l'irrigation ou choisir le moment le plus opportun pour les traitements phytosanitaires. D'où un besoin crucial d'outils fiables et performants. Ainsi connaissez-vous peut-être l'application La météo agricole, laquelle compte, outre le trafic sur son site en libre accès, 12 000 abonnés. Et elle est loin d'être la seule : rien qu'en France, il existe une dizaine de plateformes et d'applications d'agrométéorologie. Parmi les plus connues, les outils et services météo experts pour l'agriculture de Météo France, ceux de Sencrop, de Frogcast (une émanation indirecte du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ou encore de Weenat. Avec des abonnements annuels qui vont de 39,49 € pour La météo agricole à plus de 500 euros pour Sencrop, dotée de l'option pilotage des fongicides sur vigne !

« Le réel intérêt de ces applications pour les agriculteurs et les coopératives agricoles est d'améliorer leurs conditions d'intervention dans leurs exploitations, en particulier pour tout ce qui a trait à l'irrigation et à l'application de produits », assure Geoffroy Gilot, conseiller spécialisé au sein de la coopérative Océalia (sous contrat avec Sencrop depuis 2019).

Toutes les plateformes et applications d'agrométéorologie s'appuient sur les mêmes modèles de prévision météorologique que ceux utilisés pour établir la météo grand public. Il en existe une quarantaine, dont 12 globaux à l'image du modèle américain GFS (Global forecast system), l'un des plus utilisés, du modèle européen ECMWF (European centre for medium-range weather forecasts), de l'allemand Icon, ou encore Arpege de Météo France. Chaque modèle découpe le territoire en mailles qui vont de 30 kilomètres à 1 kilomètre environ. Plus la maille est petite, plus les calculs demandent du temps et de la puissance.

SENCROP

En viticulture, les données météo « ultralocales » et les capteurs permettent d'orienter les interventions des professionnels (au premier plan, un anémomètre calcule la vitesse et la direction du vent en vue d'adapter les traitements phytosanitaires).

C'est pourquoi les modèles météo sont coûteux et complexes à développer, et les opérateurs peu nombreux.
Là où l'agrométéorologie se distingue, c'est *« dans l'application qui en est faite et dans les données regardées,* explique l'ingénieur Mathieu Regimbeau, responsable de l'équipe d'agrométéorologie de Météo France. *Prenez la température : pour le grand public, elle va correspondre à un indicateur pour déterminer comment s'habiller. Pour les agriculteurs, elle permet de caractériser l'impact sur la croissance des plantes. Entre certaines dates clés de la croissance des cultures, nous allons pouvoir modéliser leur évolution en cumulant les températures depuis leur semis jusqu'à la date du jour et ainsi connaître leur niveau de stade cultural ou stade phénologique.* »
Les modélisations vont aussi servir à caractériser le risque de gel printanier, indicateur clé pour les arboriculteurs et les viticulteurs, ou à évaluer les risques de températures trop élevées. Les agrométéorologues peuvent notamment modéliser les risques d'altération de la qualité du grain et de la production en combinant le nombre de jours échaudants (lorsque les températures dépassent les 25 °C en juin) et la variété à contrôler.
De même pour les précipitations, le vent ou l'ensoleillement. *« Savoir qu'il va pleuvoir est loin de suffire aux agriculteurs.*

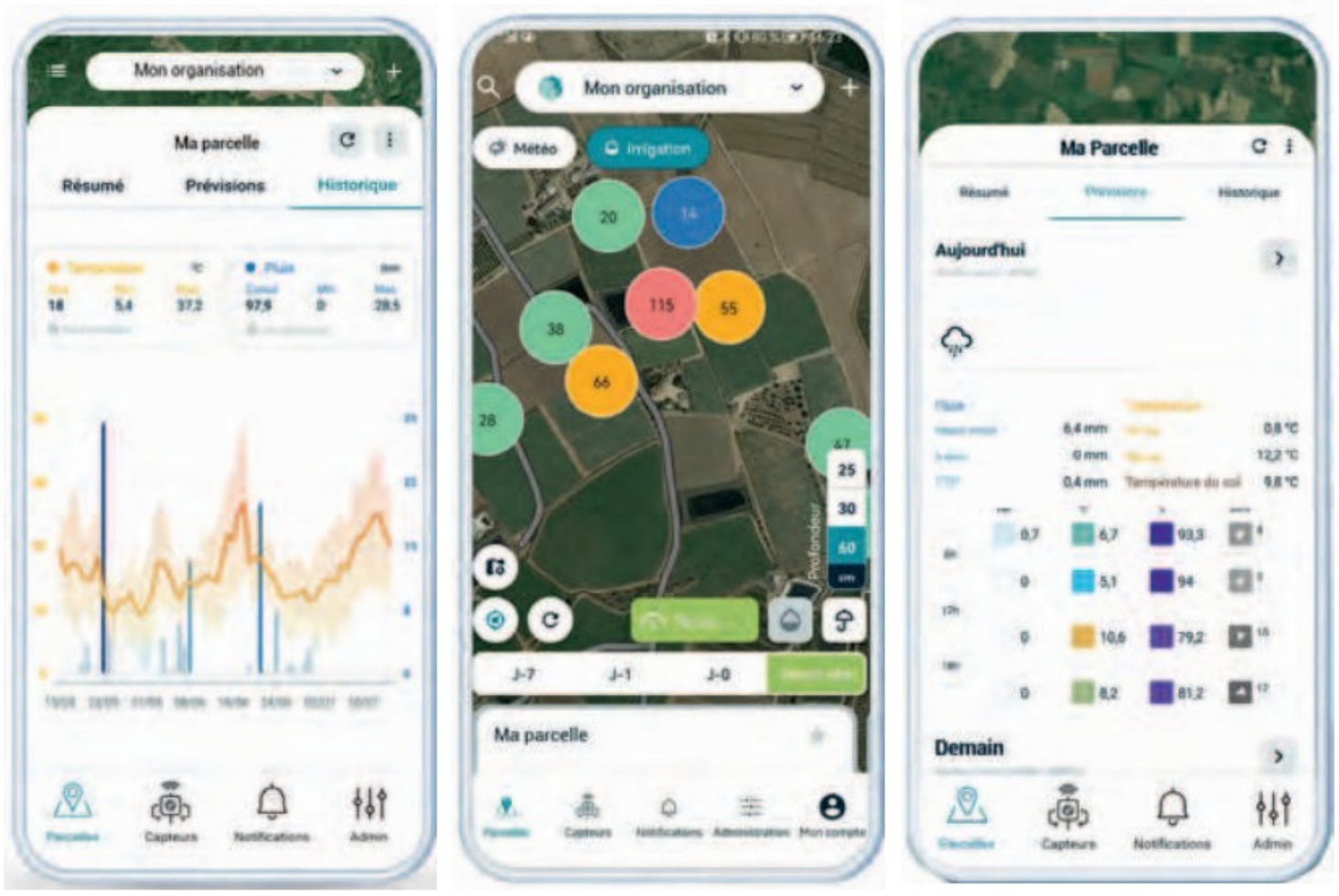
MATHIEUREGIMBEAU

« Savoir qu'il va pleuvoir est loin de suffire aux agriculteurs. Il leur faut une vision en continu avec la quantité de précipitations cumulées »

Mathieu Regimbeau, responsable de l'équipe d'agrométéorologie chez Météo France

Agrométéorologie

Ils ont besoin d'en connaître la quantité et surtout d'avoir une vision en continu avec la quantité de précipitations cumulées sur les derniers jours, précise Mathieu Regimbeau. *Pour le monde agricole, il faut une météo sans interruption et en mesure d'agréger les jours passés et les prochains.* »



L'application Weenat propose à l'agriculteur de consulter les données météo sur sa parcelle. Une carte permet également de suivre l'irrigation des sols (au centre).

Des référentiels possédant 30 années de données

« *La météo agricole, c'est aussi une météo contextualisée,* souligne Martin Ducroquet, cofondateur de Sencrop. *Les agriculteurs vont s'attarder sur des données météo différentes selon le contexte de leur culture et selon le moment de l'année. C'est particulièrement vrai pour prévenir le gel, l'arrivée de maladies ou la force des vents.* » Une culture maraîchère sous serre sera ainsi peu sensible au vent, alors qu'une grande céréale sera exposée à un risque de verse selon son stade phénologique.

Concrètement, les applications de météo agricole fournissent donc les données de température heure par heure et sur plusieurs jours, d'humidité, de vent, le point de rosée, l'évapotranspiration potentielle, le rayonnement solaire global, le cumul de précipitations sur le mois écoulé ou encore le déficit hydrique à 30 jours. Et, selon les abonnements choisis, elles apportent des conseils sur les bonnes fenêtres pour intervenir : pulvérisation, protection contre le gel, irrigation, récolte… Spécialisés par filières de production, les 19 instituts techniques agricoles français privés s'emploient à apporter des solutions opérationnelles et durables aux agriculteurs et aux filières. Dans ce cadre, ils fournissent des modèles de prévision agronomique. Arvalis, l'institut technique des grandes cultures et fourrages, diffuse par exemple des modèles « protection des céréales » pour prévenir les risques de maladies fongiques. L'Institut français de la vigne et du vin (IFV) a développé des modèles « potentiels systèmes » pour lutter contre le mildiou, l'oïdium ou le *black rot*. Ces modèles reposent sur un référentiel météorologique possédant au moins trente années de données. « *Ce référentiel est différent pour chaque vignoble,* explique l'IFV. *Car 10 mm de pluie en Champagne n'ont pas le même effet sur le mildiou que 10 mm à Gaillac.* »

Pour être précise, l'information doit être « ultralocale »

« *Nous intégrons d'un côté les prévisions météo et de l'autre les modèles agronomiques pour les croiser et finalement aider les agriculteurs à prendre des décisions d'intervention et de manipulation éclairées* », explique Nicolas Potier, chef de produit données chez Sencrop. De même, les fournisseurs de données et services agrométéorologiques s'appuient sur des modèles de calcul existants pour fournir des indicateurs comme le point de rosée ou l'évapotranspiration potentielle, qui permettent d'estimer les besoins en eau d'une plante à partir de données météo. « *Nous pouvons ainsi renseigner les agriculteurs sur les quantités d'eau à apporter à leurs parcelles et quand intervenir en cas de risque de développement de maladies ou d'attaques de parasites* », précise Mathieu Regimbeau. Car le traitement des cultures dépend aussi des conditions météorologiques. Humidité insuffisante, température de l'air trop élevée, vents supérieurs à 19 km/h peuvent nuire à l'efficacité des produits ou à la sécurisation de leur application.

INDEMNISATIONS

Caractériser les calamités agricoles

Si l'agrométéorologie a pour rôle principal d'accompagner les agriculteurs et de leur permettre d'anticiper des actions dans leurs exploitations, elle constitue également un instrument pour aider le ministère de l'Agriculture à caractériser les calamités agricoles. *« Qu'il s'agisse d'un gel printanier extrême, d'un excès en eau anormal, d'une sécheresse ou d'un orage de grêle inhabituels, Météo France et nos services utilisent les données météo et territoriales pour juger l'événement à la demande du ministère*, explique Mathieu Regimbeau. *Si une calamité agricole est caractérisée, alors les agriculteurs peuvent déposer un dossier pour être indemnisés. »* L'importance de la météo se conjugue aussi au passé.

Reste que pour être précise, l'information doit être également « ultralocale ». La plupart du temps, l'échelle communale ne suffit pas. *« Entre deux exploitations séparées d'un kilomètre, certaines conditions peuvent être différentes en raison du relief notamment »*, signale Mathieu Regimbeau. Pour augmenter la précision, les fournisseurs de services d'agrométéorologie comparent les modèles de prévisions et intègrent en plus des données d'observation en temps réel.

Un réseau de 20 000 stations météo déployées en France

« Nous travaillons avec des modèles globaux tels que l'ECMWF dont les mailles mesurent 9 km, et d'autres en appoint », révèle Damien Gentilleau, fondateur de La météo agricole. Pour contenir les coûts, il n'intègre que les données des stations météo en accès libre, telles celles des aéroports. De son côté, Météo France s'appuie sur 25 satellites météorologiques, des avions, des ballons-sondes, des bouées, 39 radars météo ou encore 2000 stations autonomes de métropole et d'outre-mer. Ils alimentent ses modèles d'un million et demi d'observations par heure ! *« Cette approche nous permet d'avoir un jeu de données météo complet de qualité identique à celle d'une station qui serait implantée sur la parcelle de l'agriculteur qui a recours à nos services »*, explique Mathieu Regimbeau.

Chez Sencrop, le modèle est encore différent. L'entreprise s'appuie d'un côté sur la comparaison de 40 modèles de prévision et de l'autre sur un réseau de 40 000 stations météo déployées à l'échelle européenne, dont 20 000 en France ! Installée par un agriculteur ou une coopérative, chacune permet de mesurer la température, l'humidité, l'hygrométrie du sol jusqu'à 50 cm ou encore la vitesse du vent. Les données remontent toutes les 15 minutes. *« Cela nous permet de comprendre ce qui se passe à 1,5 mètre du sol sur un maillage très dense,* ponctue Martin Ducroquet. *Et la comparaison de tous les modèles de prévision nous permet d'établir leur pertinence en fonction de chaque indicateur et des échelles de temps de prévision. » « Nos utilisateurs gagnent ainsi en moyenne 15 % de fiabilité sur leurs prévisions, ce qui peut être crucial »*, insiste Nicolas Potier.

De nouveaux gains en précision sont à prévoir. Chez Météo France, les 21,48 pétaflops de puissance de calcul de ses deux supercalculateurs (Belenos et Taranis) alliés aux données et à la qualité d'image de Météosat 3e génération, placé en orbite en décembre 2022, vont bientôt permettre d'améliorer la résolution du modèle Arome à 500 mètres ! Sans compter l'arrivée annoncée de l'intelligence artificielle. Elle est par exemple testée chez Sencrop pour prédire la pluie tombée ou la température d'une zone non couverte par des stations. Mais pour l'heure, aucune application ne l'a encore intégrée. ■

Fanny Costes

NICOLAS POTIER

« Nous intégrons à la fois les prévisions météo et les modèles agronomiques pour les croiser et aider à la prise de décisions »

Nicolas Potier, chef de produit données chez Sencrop

SCÉNARIOS

Évaluer l'impact du changement climatique

Si la météo est l'évaluation du temps qu'il fait ou qu'il va faire à très court terme, le climat fait, lui, référence à une moyenne des conditions météorologiques sur une longue période. Les climatologues utilisent généralement des périodes dites de référence de 30 ans. *« Aujourd'hui, grâce à la quantité de données accumulées depuis plus de 30 ans, nous sommes aussi en mesure de modéliser le changement climatique sur la base de scénarios de réchauffement global d'ici à 2100 »*, explique Mathieu Regimbeau, agrométéorologue à Météo France. Accessible librement pour la filière agricole, le service Climatdiag permet d'évaluer la vulnérabilité des pratiques et des territoires au changement climatique pour plus de 200 indicateurs ciblés par production agricole (grandes cultures, élevage, arboriculture…) et sur un maillage de 8 km par 8 km. Les résultats sont disponibles pour poser un diagnostic selon trois scénarios de réchauffement fixés par la Trajectoire de réchauffement de référence pour l'adaptation au changement climatique (Tracc) : +2 °C, +2,7 °C et +4 °C. Les professionnels de la viticulture, par exemple, peuvent quantifier et visualiser l'évolution du risque de gel tardif pour la vigne, l'évolution du déficit hydrique sur le cycle cultural ou encore l'évolution de la disponibilité thermique liée à chaque cépage.

IGGI BOO /GETTY IMAGES

Jeûne

Quels effets protecteurs pour la santé ?

Des études récentes montrent que la restriction calorique provoque un chamboulement métabolique, avec des effets positifs sur le système cardio-vasculaire, le niveau de cholestérol ou le risque de diabète. Plus adapté au quotidien, le jeûne intermittent a aussi ses avantages. Explications.

Par Nicolas Gutierrez C.

À peine 18 h. Cela ne fait que trois heures que je suis à la Maison du jeûne, et j'ai déjà faim ! Pourtant, les participants au stage de jeûne, qui eux sont là depuis six jours, le vivent beaucoup mieux. *« C'est incroyable, je n'ai absolument pas faim. Pourtant, on parle énormément de bouffe »*, s'étonne Élizabeth, 56 ans, qui se décrit comme très gourmande. Comme les autres jeûneurs présents, cette professeure des écoles dans l'Hérault se dit très satisfaite du stage et voudrait renouveler l'expérience. Vu le cadre qui nous entoure — et excepté la partie plus astreignante : rien manger pendant sept jours —, il n'est pas difficile de la comprendre. Piscine, jacuzzi, yoga, massages… le centre de jeûne localisé près d'Aix-en-Provence offre un environnement idyllique. *« Le cadre rend le jeûne plus agréable, comme des vacances »*, résume Jean-Pascal David, qui propose ce stage de sept jours (facturé entre 700 et 1300 euros, tout compris). Sa Maison du jeûne est l'un des 130 centres labélisés par la Fédération francophone de jeûne et randonnée, créée en 2003. Ils proposent des diètes inspirées de celles pratiquées en Allemagne dans les cliniques de jeûne Buchinger Wilhelmi, avec des activités physiques douces, telles que la randonnée et l'aquagym, et des apports nutritionnels journaliers en vitamines et minéraux. Durant la semaine, les participants ont tout de même droit à un jus de légumes le matin et un bouillon de légumes le soir, avec eau et tisanes à volonté. Et le dernier jour, ils rompent le jeûne avec un plat de légumes cuits. *« Mais on ne jeûne pas comme ça du jour au lendemain,* précise Jean-Pascal David, aussi formateur au sein de cette fédération. *Il y a une préparation à suivre la semaine précédant le stage : les participants arrêtent de manger des produits raffinés et de la viande, pour finir avec seulement des fruits et*

LA MAISON DU JEÛNE

NICOLAS GUTIERREZ

Des activités physiques douces, comme la randonnée, sont proposées durant le stage organisé par la Maison du jeûne (en haut). Pendant six jours, le repas du soir est composé uniquement de bouillon de légumes.

des légumes. L'idée est de ne pas brutaliser le corps à l'entrée dans le jeûne. »
La formation des encadrants comporte d'ailleurs un volet santé, avec la participation de l'Académie médicale du jeûne, fondée en 2019, qui regroupe plus de 70 professionnels de santé.

Attention aux dérives, fréquentes

Car le jeûne n'est pas quelque chose de banal, et les dérives sont fréquentes. Au point d'être inclus dans le dernier rapport de la Mission interministérielle de vigilance et de lutte contre les dérives sectaires, Miviludes. *« Il y a quelques "gourous", comme Thierry Casasnovas* [placé sous contrôle judiciaire en 2023 pour exercice illégal de la médecine et abus de faiblesse]*, qui se prennent pour des dieux et sont persuadés que le jeûne peut tout guérir,* se désole Jean-Pascal David. *Et à un moment donné, il arrive un accident. Cette croyance que le corps peut se soigner entièrement est un problème qui a augmenté avec le Covid.* »
Croyance qui peut être fatale, comme ça a été le cas en Vendée, où un homme est décédé en 2020 et une femme en 2022. Tous deux étaient atteints d'un cancer et ne suivaient plus leur traitement, remplacé par le jeûne sous les conseils d'Éric Gandon, interdit d'organiser des stages de jeûne depuis. *« C'est pourquoi la fédération propose des stages seulement pour les personnes en bonne santé* [mais aucun certificat médical n'est demandé]. *Le but est préventif, pas thérapeutique,* précise Jean-Pascal David. *Des stages médicalisés, encadrés par un médecin, peuvent en revanche prendre en charge des personnes avec certaines maladies : diabète, hypertension, maladies inflammatoires, mais pas le cancer.* »
L'objectif est donc la prévention. Mais mis à part le bienfait de ce repos de sept jours dans un cadre agréable, s'affamer a-t-il un quelconque effet protecteur pour la santé ? *« Le manque de nourriture a été un moteur essentiel de notre évolution, les personnes qui fonctionnaient le mieux en état de privation alimentaire avaient un avantage de survie,* expose Mark Mattson, professeur de neurosciences à l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis. *Maintenant que nous mangeons trois repas par jour et ne faisons plus beaucoup d'exercice, ces systèmes d'optimisation corporelle ne sont plus activés. Le stress énergétique causé par le jeûne peut y remédier, à condition qu'il soit suivi d'une période de récupération (manger et se reposer).* »

Des cellules qui se nettoient et rajeunissent

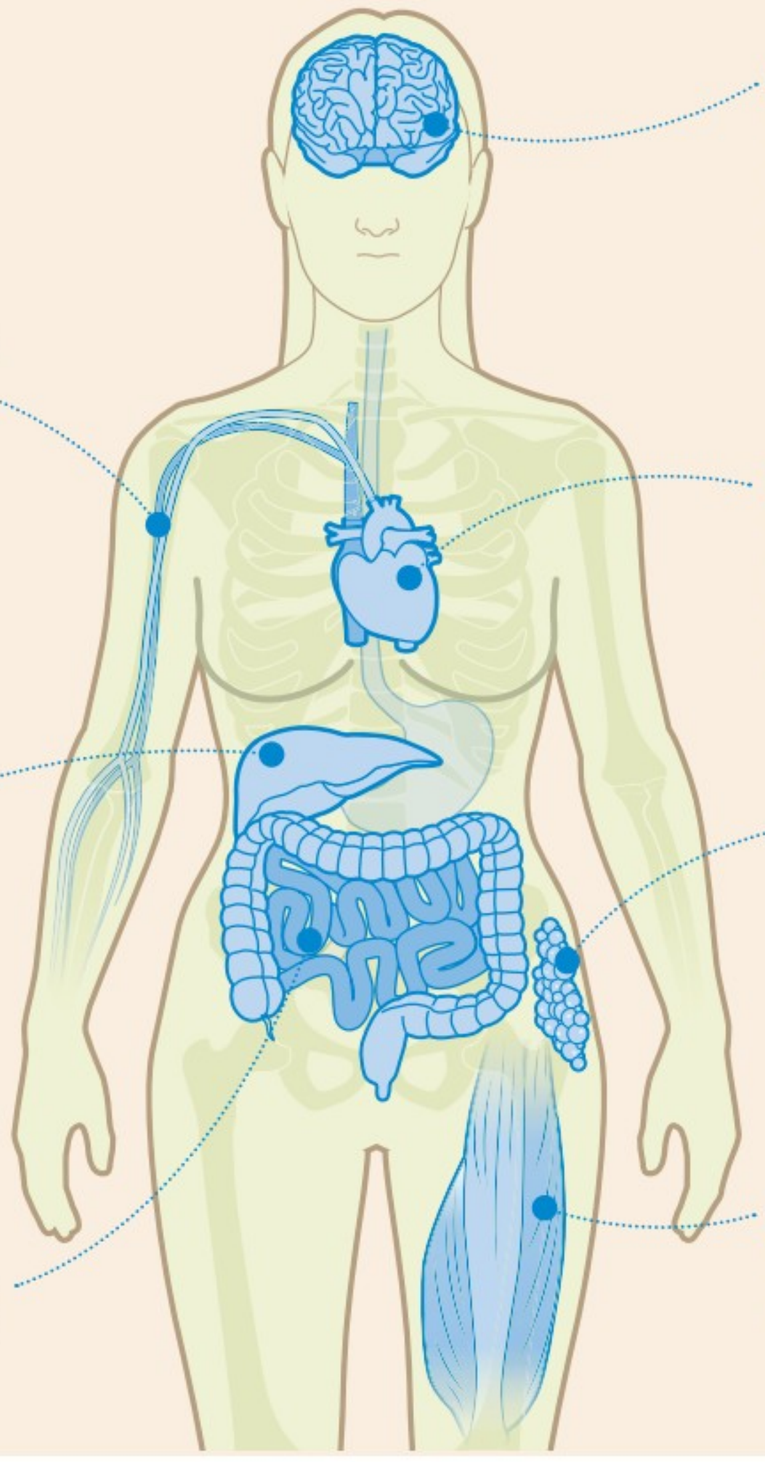
Des études récentes montrent en effet que le jeûne provoque bien un chamboulement métabolique, avec des effets positifs. Ce « switch » métabolique survient quand l'organisme remplace le glucose — vite épuisé en l'absence d'apports alimentaires — par des corps cétoniques *(lire l'encadré ci-contre)*. Ces petites molécules de substitution sont produites par le foie à partir des acides gras libérés par le tissu adipeux. Ce basculement arrive après 12 à 14 heures de jeûne, soulageant certains organes qui ont besoin de beaucoup de glucose, comme le cerveau. *« Un corps cétonique particulièrement intéressant est le bêta-hydroxybutyrate, qui agit aussi comme une hormone et active l'expression de plusieurs gènes, dont des facteurs de croissance neuronaux qui sont importants pour l'apprentissage et la mémoire* », détaille Mark Mattson.
Une autre conséquence bénéfique du jeûne est l'autophagie, processus par lequel les cellules recyclent des protéines et autres molécules, pour s'adapter au contexte de privation alimentaire. *« Imaginez que l'épicerie du coin est fermée : il faut donc faire avec ce qu'on a, et manger tout ce qui avait été oublié au fond des placards,* illustre Oleh Lushchak, chercheur en biochimie à l'université nationale subcarpatique Vassyl-Stefanyk, en Ukraine. *Ça permet de nettoyer la cellule et de la rajeunir, mais il faut attendre environ 16 heures sans man-*

PHYSIOLOGIE

Quand l'organisme remplace le glucose par des corps cétoniques

Lors du jeûne, le niveau de glucose baisse rapidement et le corps utilise des réserves en acides gras pour produire de l'énergie. Mais certains organes nécessitent des glucides. D'abord, le corps utilise des réserves en glycogène, mais celles-ci s'épuisent au bout de 12 heures sans manger. C'est là que les corps cétoniques entrent en jeu. *« La quantité d'acides gras libérés par le tissu adipeux est tellement grande que le foie est dépassé. Il déclenche donc une voie alternative pour gérer ce surplus, la cétogenèse,* explique Sander Kersten, chercheur en nutrition à l'université Cornell, aux États-Unis. *Ces acides gras agissent aussi comme activateurs des mécanismes nécessaires à la cétogenèse.* » Ils interagissent notamment avec un récepteur dans le noyau cellulaire des hépatocytes, PPAR-alpha, qui ensuite déclenche l'expression de centaines de gènes. Une autre protéine importante activée lors de ce processus est la kinase AMPK, alors que l'enzyme mTOR est bloquée. Ensemble, cela stimule l'autophagie, par laquelle les cellules recyclent des protéines endommagées, entre autres. En parallèle, les adipocytes relâchent l'hormone adiponectine, qui a un effet contre l'inflammation en bloquant la production de la cytokine pro-inflammatoire TNF et en stimulant la production de la cytokine anti-inflammatoire interleukine 10.

Les effets positifs du jeûne



CERVEAU
- Meilleure cognition
- Croissance des neurones favorisée
- Plasticité synaptique
- Biogenèse mitochondriale

SANG
- Niveau élevé de corps cétoniques
- Niveau élevé d'adiponectine
- Diminution du glucose, de l'insuline et de la leptine
- Diminution des cellules pro-inflammatoires
- Diminution des marqueurs de stress oxydatif

SYSTÈME CARDIO-VASCULAIRE
- Diminution de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque
- Amélioration du système nerveux parasympathique
- Meilleure résistance au stress

FOIE
- Épuisement du glycogène
- Production de corps cétoniques
- Augmentation de la sensibilité à l'insuline
- Réduction de l'accumulation de lipides

TISSUE ADIPEUX
- Lipolyse
- Production réduite de leptine
- Diminution de l'inflammation

INTESTINS
- Motilité intestinale améliorée
- Réduction de l'inflammation

MUSCLE
- Meilleure sensibilité à l'insuline
- Meilleure endurance
- Diminution de l'inflammation

BRUNO BOURGEOIS

VALTER LONGO
GÉRONTOLOGUE À L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE DU SUD, À LOS ANGELES (ÉTATS UNIS) *

Un régime pour standardiser le protocole du jeûne

Quel est l'intérêt du régime d'imitation du jeûne ?
Ce régime permet de standardiser le protocole du jeûne pour tout le monde, évitant les effets indésirables et facilitant une reproductibilité lors des essais cliniques. Il aide aussi les patients, car le plus difficile dans le fait de jeûner, c'est le mental. Le jeûne est plus facile à suivre quand vous recevez une boîte avec tout ce que vous devez consommer à chaque repas et des instructions précises.

Si les patients peuvent manger, cela ne casse-t-il pas le processus physiologique du jeûne ?
Le régime est fait à partir de nos connaissances sur l'effet des nutriments sur la réponse au jeûne. Il faut éviter le sucre et les protéines, alors que le gras ne pose pas de problème. Lors du jeûne, le corps libère beaucoup d'acides gras, et le gras du régime vient donc se mélanger à ces lipides produits naturellement.

D'où vient le gras utilisé dans ce régime ?
Il est basé sur l'alimentation des régions à haute longévité, dont le bassin méditerranéen ou Loma Linda en Californie. Ces cultures ont en commun un certain nombre d'aliments, notamment le gras issu d'oléagineux, tels que les noix ou les olives. L'apport total en calories varie entre 800 et 1100 kcal, c'est-à-dire environ la moitié d'un apport journalier normal (autour de 2000 kcal). C'est une quantité raisonnable de nourriture, tout en permettant la réponse physiologique au jeûne.

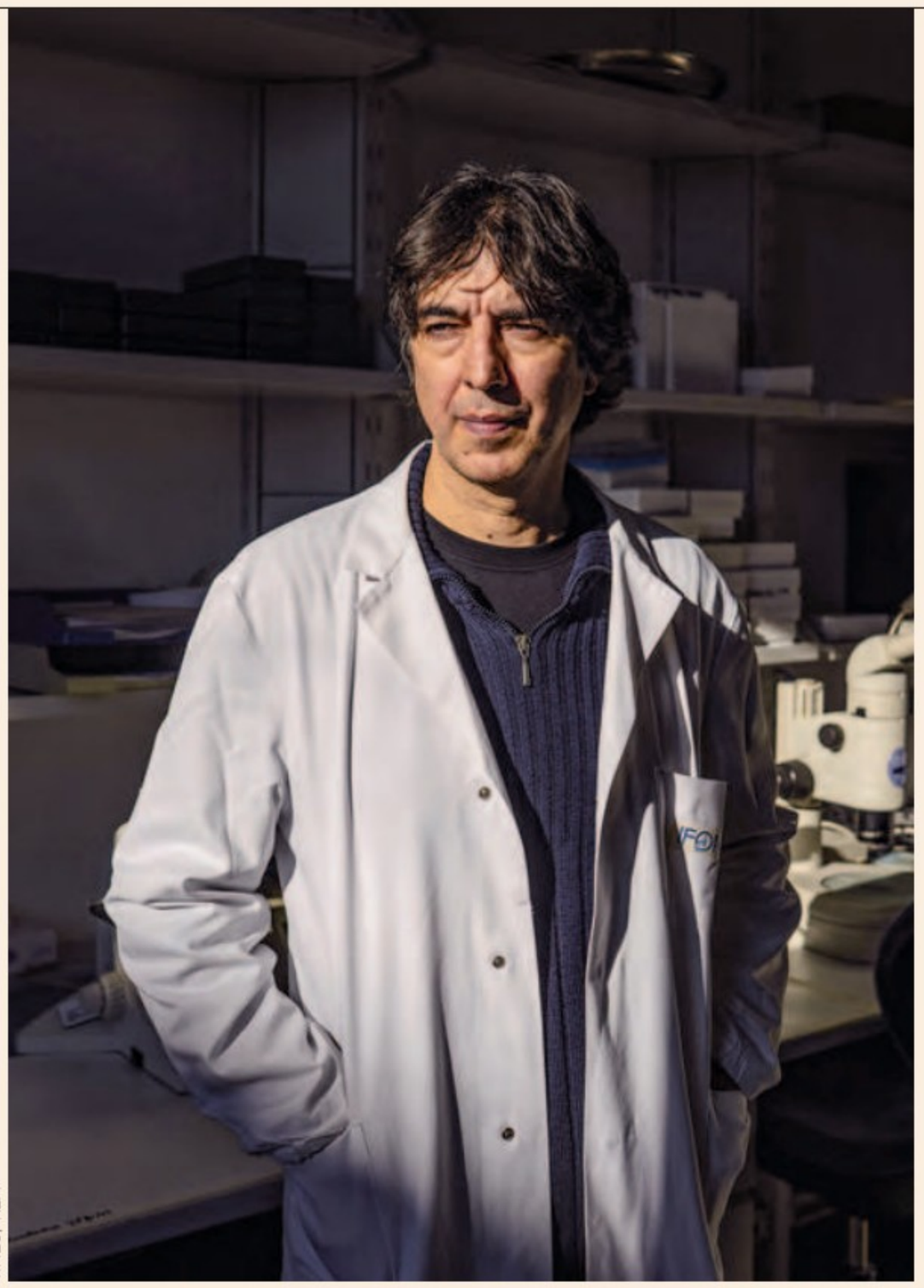
Quels sont les bienfaits observés ?
Les essais cliniques montrent clairement une perte de graisse viscérale, avec peu de perte de masse musculaire, et une diminution de la résistance à l'insuline, permettant aux personnes diabétiques de réduire leur traitement contre le diabète. Le taux de cholestérol baisse, ainsi que la pression artérielle. Contre le cancer du sein, la chimiothérapie est

▶ *ger pour l'activer.* » Quelques essais cliniques confirment ces effets protecteurs. Dans un article publié en 2022 dans le *Journal of Clinical Medicine*, des chercheurs de l'université de Duisbourg et Essen, en Allemagne, ont mis en évidence des changements physiologiques bénéfiques d'un jeûne de cinq jours chez une cohorte de 145 adultes avec un syndrome métabolique. En plus d'une perte de poids, les participants bénéficiaient d'une baisse de la pression artérielle et d'une amélioration de la sensibilité à l'insuline.

Cependant, les jeûnes de plusieurs jours pourraient aussi avoir quelques effets négatifs, comme cela a été montré par des chercheurs de l'hôpital universitaire de la Charité de Berlin, en Allemagne. Dans *Nature Metabolism*, en 2024, ils ont mis en évidence chez des jeunes en bonne santé qu'un jeûne total (en buvant seulement de l'eau) durant sept jours changeait l'expression d'un millier de protéines. Certains de ces changements étaient bénéfiques, mais d'autres étaient plus problématiques : les hormones nécessaires à la reproduction n'étaient plus sécrétées, et les participants présentaient un risque accru de caillots sanguins. *« Ces jeûnes de plusieurs jours diminuent rapidement le niveau de glucose et d'insuline, activent l'autophagie et entraînent un* switch *métabolique bénéfique. Mais ils peuvent aussi causer de l'hypoglycémie et de la fatigue »*, abonde Lixia He, chercheuse en nutrition à l'université Harvard, aux États-Unis. C'est pourquoi le jeûne est difficile s'il n'est pas bien encadré. Il peut également causer des symptômes désagréables tels que des maux de tête, des nausées et des tachycardies. Et même si le corps a suffisamment de gras pour tenir des semaines sans manger, le cerveau est programmé pour éviter la faim et devient rapidement obsédé par l'idée de manger. À l'image des participants du stage de jeûne, qui pensaient beaucoup à ce qu'ils aimeraient se mettre sous la dent. *« Je n'ai pas faim, mais j'ai envie de manger,* nous confiait ainsi Tina, 41 ans, vendeuse en Belgique. *Des frites, ça m'irait bien ! »*

« Nous recommandons le jeûne intermittent, qui est plus flexible et plus facile à suivre », conseille Lixia He. Ce jeûne à la carte existe en trois versions : le 5/2, où l'on mange normalement pendant cinq jours, puis très peu (environ un quart des calories) pendant deux jours ; le

Le jeûne doit être évité chez les personnes très âgées, les femmes enceintes et allaitantes et chez les moins de 18 ans



TIMES / REA

jeûne alterné, qui consiste à ne manger qu'un jour sur deux ; et le jeûne à plage horaire limitée, où l'on mange seulement pendant quelques heures de la journée (par exemple de midi à 20 heures). *« C'est la meilleure option pour ceux qui débutent »*, estime la chercheuse. *« Pour commencer, le plus simple est de faire 12 heures de jeûne, donc manger par exemple de 8 h à 20 h, puis on peut augmenter progressivement cette fenêtre jusqu'à 16 ou 18 heures de jeûne »*, précise Oleh Lushchak.

Une diminution de la résistance à l'insuline

De par sa praticité, cette dernière version est aussi la plus étudiée, montrant un grand nombre d'effets protecteurs. *« Le jeûne intermittent diminue le risque de maladie cardio-vasculaire, en baissant la pression artérielle, le niveau de cholestérol LDL et de triglycérides, ainsi que le risque de diabète, en réduisant le niveau de glucose et d'insuline et en diminuant la résistance à l'insuline,* résume Krista Varady, professeure en nutrition à l'université de l'Illinois à Chicago, aux États-Unis. *Il permet aussi de perdre du poids, car l'apport calorique durant la journée diminue, mais cette perte est faible, autour de 3 % du poids corporel sur une année, contre 7 % pour le jeûne alterné. »* La restriction calorique pourrait même augmenter l'efficacité des traitements contre le cancer : *« Les cellules cancéreuses sont affaiblies par le manque de glucose, et donc succombent plus rapidement lorsqu'elles sont attaquées par la chimiothérapie ou la radiothérapie »*, explique Mark Mattson, auteur de *The Intermittent Fasting Revolution* (« La Révolution du jeûne intermittent », inédit en France). *Ces traitements restent nécessaires, le jeûne ne ferait que les rendre plus efficaces. »* La question ne fait toutefois pas consensus, et le jeûne n'est pas conseillé à des personnes atteintes d'un cancer.

Par ailleurs, le jeûne peut comporter des risques et doit donc être évité chez les personnes très âgées (avec un risque accru de malnutrition), les femmes enceintes ou allaitantes et les mineurs. *« C'est particulièrement dangereux chez les enfants qui n'ont pas atteint la puberté »*, alerte Stephan Herzig, directeur de l'Institut du diabète et du cancer au Helmholtz Zentrum, à Munich (Allemagne). Dans une étude publiée en février dans *Cell Reports*, il a montré chez la souris que le jeûne perturbe le développement du pancréas, augmentant le risque de diabète plus tard dans la vie. *« En revanche, on peut le conseiller à tout adulte en bonne santé »*, assure-t-il. *« Le jeûne est bénéfique, mais il faut éviter de se rendre misérable à cause de la faim, juste pour vivre quelques années de plus,* rappelle Oleh Lushchak. *Je préfère vivre plus heureux que plus longtemps. À chacun de trouver le bon équilibre. »* ■

plus efficace chez les femmes qui suivent ce régime et leur taux de survie est plus élevé. En général, la santé du corps s'améliore, ce qui se reflète dans l'âge biologique.

Peut-on faire confiance à ces résultats, sachant que vous êtes le fondateur de l'entreprise qui produit ce régime d'imitation du jeûne ?

La grande majorité de ces essais sont réalisés par des universités indépendantes, qui ne reçoivent aucun financement de notre part. Il n'y a vraiment pas d'influence d'aucune entreprise sur ces résultats.

Combien de temps ces effets bénéfiques perdurent-ils ?

La plupart des essais réalisés comptent trois à six cycles, où le participant suit le régime cinq jours par mois, durant trois à six mois. Lorsqu'on regarde ces personnes quelques mois plus tard, on s'aperçoit qu'environ 60 % des effets persistent pendant au moins trois mois après la fin de l'intervention, pouvant aller jusqu'à 12 mois pour certains marqueurs. Mais l'idée n'est pas que le patient refasse des cycles du régime sans cesse. L'objectif est que la personne soit soignée et n'ait plus besoin de ce régime. Ensuite, une alimentation équilibrée suffira pour rester en bonne santé. ■

Propos recueillis par N. G. C.

* Auteur de « *The Longevity Diet* » et *Fasting Cancer* (inédits en France) et créateur du régime d'imitation du jeûne (commercialisé en France par Prolon).

Covid-19 : la piste de l'accident de laboratoire

Cinq ans après la pandémie, des scientifiques s'accordent pour considérer comme plus probable la fuite accidentelle du virus Sras-CoV-2 hors d'un laboratoire de Wuhan plutôt que son émergence dans un marché d'animaux vivants de cette ville chinoise.

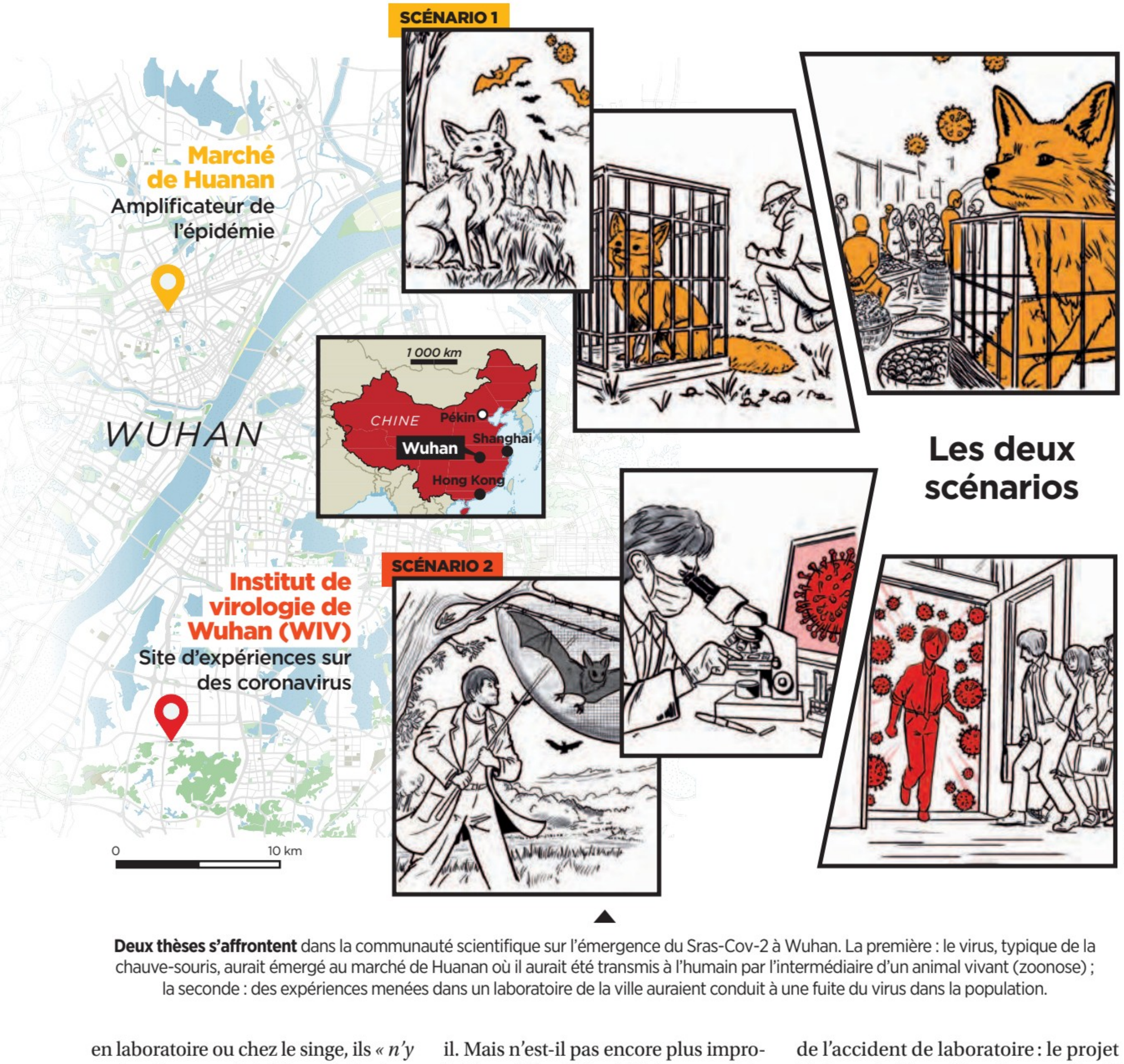
La phrase a fait l'effet d'une bombe en avril : *« 97 % de l'Académie de médecine a voté quasi unanimement pour dire que nous pensons plutôt que le Sras-CoV-2 est issu d'une erreur de laboratoire. »* D'autant qu'elle a été prononcée par le Pr Jean-François Delfraissy, président du conseil scientifique Covid-19 de mars 2020 à juillet 2022, à l'occasion de la publication d'un rapport de l'Académie de médecine sur les origines du virus (*lire l'encadré p. 103*). Jusqu'ici, l'hypothèse d'une émergence naturelle avait toujours été privilégiée. Mais Christine Rouzioux, professeure émérite de virologie, enfonce le clou : *« En tant que virologue, je ne vois pas beaucoup d'arguments en faveur de l'émergence naturelle du Sras-CoV-2. »* Quelques mois plus tôt, la CIA estimait que la fuite du laboratoire était l'hypothèse *« la plus probable »* ; et en mars, l'hebdomadaire allemand *Die Zeit* révélait les conclusions du projet Saaremaa, mené secrètement par les renseignements allemands en 2020, qui évoquaient un accident de laboratoire avec une probabilité de 80 à 95 %. Derrière les annonces, l'Académie comme l'agence de renseignement américaine restent prudentes : *« L'origine du virus Sras-CoV-2 reste une énigme »*, écrit la première, et *« les deux scénarios restent plausibles »* pour la CIA. Le mystère demeure donc, mais l'hypothèse d'une émergence dans un marché de Wuhan (Chine) n'est plus considérée comme la plus probable.

C'est d'abord un élément troublant dans la séquence du virus qui a donné corps à la thèse de l'accident de laboratoire. À sa surface, le Sras-CoV-2 présente une protéine nommée Spike. C'est elle qui reconnaît une porte d'entrée sur nos cellules, la protéine ACE2. Mais la Spike du Sras-CoV-2 possède un atout que n'ont pas les autres sarbécovirus (famille du Sras-CoV) : elle peut être coupée en un site particulier par une enzyme humaine, la furine, facilitant encore son entrée dans les cellules. *« C'est grâce à cela que le virus a acquis un potentiel pandémique »*, souligne Étienne Decroly, directeur de recherche au CNRS. Or il semble improbable que ce « site de la furine » soit apparu spontanément. Pour preuve, lorsqu'une équipe tente d'en reproduire l'émergence naturelle

SIPA

« En tant que virologue, je ne vois pas beaucoup d'arguments en faveur de l'émergence naturelle du Sras-CoV-2 »

Christine Rouzioux, professeure émérite de virologie



Deux thèses s'affrontent dans la communauté scientifique sur l'émergence du Sras-Cov-2 à Wuhan. La première : le virus, typique de la chauve-souris, aurait émergé au marché de Huanan où il aurait été transmis à l'humain par l'intermédiaire d'un animal vivant (zoonose) ; la seconde : des expériences menées dans un laboratoire de la ville auraient conduit à une fuite du virus dans la population.

en laboratoire ou chez le singe, ils *« n'y arrivent pas »*, relate Marc Eloit, virologue et ancien directeur du laboratoire Découverte de pathogènes à l'Institut Pasteur, qui a dirigé ces travaux. Cela ne signe pas obligatoirement une intervention humaine, car les virus peuvent aussi intégrer des séquences entières sans passer par une succession de mutations, mais c'est rare, et le chercheur y croit peu. *« Cependant, toutes les émergences virales sont peu probables »*, nuance-t-il. Mais n'est-il pas encore plus improbable qu'elle ait lieu à Wuhan, en plein cœur d'une ville où se trouvent précisément des laboratoires hébergeant des chauves-souris et manipulant ce type de virus ? *« Si la rage émergeait dans le XV^e^ arrondissement de Paris, on commencerait probablement par regarder vers l'Institut Pasteur avant d'imaginer que des renards enragés se promènent avenue de Suffren »*, ironise Marc Eloit. Un second élément appuie la thèse de l'accident de laboratoire : le projet Defuse, révélé par Drastic, un collectif de scientifiques, journalistes et citoyens. Dans ce projet, qui faisait l'objet d'une demande de financement en 2018, l'Institut de virologie de Wuhan (WIV) et l'ONG américaine EcoHealth Alliance décrivaient la sélection d'une quasi-espèce de Sras-CoV issue de chauve-souris, à partir de laquelle construire un virus chimérique. C'est-à-dire une souche modifiée pour y introduire des

séquences issues d'autres espèces, et dont ils testeraient ensuite la capacité à infecter des cellules pulmonaires humaines ou de souris génétiquement humanisées. Parmi les modifications suggérées, les chercheurs prévoyaient d'insérer un site de clivage par une protéase… telle que la furine. Le projet Defuse n'a jamais été financé, mais la plupart des chercheurs interrogés s'accordent à dire qu'une absence de financement n'est pas un frein pour entamer une expérimentation en attendant les fonds. *« Il faudrait qu'on pense que c'est par pure coïncidence que ce virus, qui a le portrait-robot de celui du projet Defuse émis en 2018, émerge à Wuhan en 2019 ? »*, relève Renaud Piarroux, chef de service en parasitologie et mycologie à l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière, à Paris, et auteur de *Sapiens et les microbes. Les épidémies d'autrefois* (*lire p. 121*).

ECOHEALTH ALLIANCE

La thèse de la transmission par la chauve-souris a été étudiée après qu'un virus proche du Covid-19 a été retrouvé chez ce mammifère (ici dans la province du Guandong).

L'hypothèse du marché de Huanan toujours envisagée

Reste que l'existence de Defuse n'est pas une preuve que ces expérimentations ont eu lieu, ni qu'elles ont débouché sur le Covid-19. D'ailleurs, envisager un accident de laboratoire ne signifie pas être convaincu que le virus a été construit sur les plans de Defuse. *« Cela peut aussi être un accident lors de l'échantillonnage ou de la culture virale, par exemple »*, suggère Étienne Decroly. Une coupure contaminée, une souris infectée qui tousse près d'un employé, un déchet de laboratoire mal traité… les façons dont un virus contagieux peut ensuite sortir d'un laboratoire sont nombreuses.

Ce scénario est cependant loin de faire l'unanimité. Zach Hensel, microbiologiste à l'Institut de technologie chimique et biologique Nova (Portugal), qui a collaboré à nombre de publications décortiquant les données chinoises, l'assure : *« Toutes les preuves que l'on s'attend à trouver à l'origine d'une épidémie se trouvent dans un coin du marché de Huanan et nulle part ailleurs dans le monde. »* Dans la ville de Wuhan, parmi les symptômes des 174 premiers cas d'infection au Covid-19 en décembre 2019, 28 % avaient été exposés à ce marché, un lieu fermé de 50 000 m² où se vendent notamment des animaux vivants. De quoi naturellement penser à une zoonose — une maladie transmise par l'animal. *« C'est le premier réflexe, qui fait référence à l'histoire naturelle des maladies émergentes similaires comme le Sras de 2003, probablement transmis par la civette, et le Mers de 2011 transmis par le chameau »*, explique Marc Eloit. Mais voilà, là où quelques mois ont suffi à identifier les deux espèces à l'origine de ces anciennes épidémies, cinq ans après rien n'a été trouvé pour le Covid-19. Initialement envisagé, le pangolin n'a finalement pas été retenu. *« Les premiers virus du Covid-19 avaient une composition typique de la chauve-souris, ce qui signifie qu'ils n'ont pas transité par le pangolin »*, révèle Alexandre Hassanin, phylogénéticien spécialiste des mammifères à Sorbonne Université. À la recherche d'un autre animal candidat, des chercheurs parmi lesquels Zach Hensel analysent les 923 prélèvements réalisés au marché dès le 1er janvier 2020 — date de sa fermeture — par les autorités chinoises sur les cages, chariots, murs des stands, sols et même dans les canalisations et égouts. 74 (8 %) se révèlent positifs au Sras-CoV-2. À l'époque, le virus existe sous deux formes, les lignées A et B, toutes deux retrouvées dans ces échantillons. Cela pourrait être le signe de deux contaminations séparées de l'animal vers l'humain, suggèrent certains scientifiques. Surtout, aucune

AFP

« Des clusters, il y en a certainement eu d'autres qui n'ont pas été repérés car les investigations se focalisaient sur le marché »

Renaud Piarroux, chef de service en parasitologie et mycologie à l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière, à Paris

lignée antérieure n'a été identifiée, ce qui irait dans le sens d'un démarrage d'épidémie au marché. Pour Zach Hensel, l'émergence du virus au marché reste la seule théorie valable pour expliquer que toute la diversité génétique initiale du virus (les lignées A et B) et les preuves épidémiologiques s'y soient concentrées.

Le virus peut avoir circulé avant son introduction au marché

Mais Renaud Piarroux n'est pas convaincu. « *On peut tout à fait envisager un virus circulant déjà dans la ville, avec plusieurs introductions au marché* via *des visiteurs successifs.* » Pour lui, conclure à l'émergence au marché des deux lignées A et B juste parce qu'elles y ont toutes les deux été trouvées fin décembre 2019 « *constitue une surinterprétation carrément abusive* ». Quant à ces lignées justement, elles ne diffèrent l'une de l'autre que par deux mutations. « *Deux virus avec seulement deux mutations d'écart, ça se trouve après culture dans une cellule. En virologie, on appelle cela une quasi-espèce, donc ça ne prouve rien* », abonde Marc Eloit.

Que penser alors de ce recoin de l'aile ouest, au niveau des stands 29-31-33 de l'allée 6, où ont été colocalisés le virus et l'ADN de civette, de rat des bambous et de chien viverrin ? Ce dernier est susceptible au virus et son ADN a été retrouvé en plus grande quantité. Pour les chercheurs à l'origine de ces analyses, c'est un indice en faveur de la présence d'animaux infectés. Mais corrélation n'est pas causalité : « *Un animal infecté devrait produire une quantité importante de virus. Or, on n'en trouve que très peu dans les échantillons de chien viverrin* », pointe le virologue Étienne Decroly.

Zach Hensel, qui a coréalisé ces travaux, croit effectivement moins à l'hypothèse du chien viverrin, élevé pour sa fourrure, qu'à un trafic illégal d'animaux sauvages, intraçable. « *Ces éléments sont certes compatibles avec un virus sorti de l'animal, mais aucun ne peut contredire l'hypothèse alternative qui est qu'une personne infectée vienne sur ce marché, voire y infecte les animaux présents* », remarque l'épidémiologiste Marius Gilbert, qui a officié au sein du conseil scientifique du gouvernement belge. « *Certains chercheurs font parfois dire à leurs résultats des choses qu'ils ne disent pas toujours* », relève-t-il.

L'origine zoonotique n'a jamais pu être prouvée

Même la forte concentration des premiers cas de Covid-19 autour du marché n'est pas une preuve. « *Des clusters, il y en a certainement eu d'autres qui n'ont pas été repérés car les investigations se focalisaient sur le marché* », contre Renaud Piarroux. Cinq ans après et sans données supplémentaires, il est bien sûr impossible de le vérifier. Reste que cela ne serait pas étonnant, les chercheurs des deux bords s'accordant à dater les premières contaminations de Covid-19 à la mi-novembre 2019, si ce n'est plus tôt.

Départager les deux hypothèses nécessiterait un nouvel élément décisif. Pour la fuite de laboratoire, « *la seule preuve formelle serait de trouver le virus dans le laboratoire de Wuhan* », remarque Renaud Piarroux. Pour la zoonose, ce serait d'identifier l'espèce intermédiaire ayant permis le saut d'espèce entre la chauve-souris et l'humain. « *C'est l'argument qui me fait le plus douter de l'hypothèse zoonotique,* relève Étienne Decroly. *Cette épidémie apparaît dans une ville hypermoderne avec trois centres de recherche en virologie experts des coronavirus et toutes les capacités nécessaires pour tracer les origines des épidémies. Et cinq ans après, ni le virus progéniteur (l'ancêtre direct chez la chauve-souris), ni l'animal responsable des premières contaminations n'ont été identifiés.* » Les partisans de l'émergence zoonotique rétorquent que le réservoir animal a pu disparaître, invoquant qui les abattages d'animaux infectés de l'époque, qui la possibilité d'une émergence transitoire qui aurait juste eu le temps de passer vers l'humain. « *Ce serait du jamais-vu* », tranche Renaud Piarroux. ■

Camille Gaubert

RAPPORT

Des mesures à prendre pour limiter les risques

Que le Covid-19 soit issu d'un laboratoire ou d'un animal, des mesures doivent être prises pour éviter que cela ne se reproduise, ambitionne un rapport de l'Académie de médecine publié en avril. « *Les banques de données doivent être renforcées, harmonisées et rester accessibles* », explique Christine Rouzioux, professeure émérite de virologie et coautrice du rapport. Quant aux risques de fuite de laboratoire, ils ne cessent d'augmenter. 75 % des futurs P4 (permettant de manipuler les pathogènes les plus dangereux) se trouveront dans des villes denses, alerte l'initiative Global Biolabs, créée en 2021 par des experts en biosécurité. « *Les manipulations virales sont de plus en plus accessibles et leurs risques sous-estimés par nombre de chercheurs* », s'inquiète Christine Rouzioux. L'Académie recommande notamment la mise en place de « boîtes noires » biologiques permettant de remonter à la source des erreurs, de comités d'éthique, d'un renforcement des règles de biosécurité et de l'obligation de déclarer tout accident même mineur.

L'olive sous toutes ses formes

Le fruit de l'olivier est riche en nutriments antioxydants et anti-inflammatoires. Les olives de table participent aussi à la bonne santé du microbiote intestinal.

Tanche de Nyons, lucques du Languedoc, picholine de Nîmes… Près de 100 variétés d'olives de table sont cultivées en France. Vertes, violettes ou noires (toutes proviennent du même arbre), les Français en raffolent. En 2022, ils ont ainsi consommé 91 000 tonnes d'olives de table alors que le pays n'en a produit que 650 tonnes. Le Maroc, l'Espagne et, dans une moindre mesure, la Grèce, sont nos principaux fournisseurs (1).

Légèrement calorique (155 kcal pour 100 g d'olives vertes et 210 kcal pour les noires, plus si elles sont farcies), mais riche en nutriments antioxydants et anti-inflammatoires, ce fruit de l'olivier se déguste tel quel ou à l'huile, inclus dans des salades, des plats et, bien sûr, en tapenade au moment de l'apéritif.

La préparation de l'olive de table

L'olive verte ne peut être consommée telle quelle en raison de son amertume, liée à la présence d'**oleuropéine**. Pour la rendre comestible, elle est d'abord trempée dans plusieurs eaux durant plusieurs jours ou, parfois, pour la préparation des picholines de Nîmes et des olives espagnoles par exemple, plongée dans un bain d'hydroxyde de sodium (soude NaOH) ou de potassium, suivi de plusieurs rinçages. Les olives sont ensuite placées dans une saumure, une préparation d'eau et de sel marin (2). En revanche, les olives noires dites à la grecque, cueillies, elles, à maturité, sont directement immergées dans une solution de saumure sans aucun traitement de désamérisation. Mais prudence : pour gagner du temps,

650 tonnes
d'olives de table ont été produites en 2022 en France, ainsi que 3696 tonnes d'huile d'olive, ce qui place le pays au 6e rang des producteurs européens d'huile d'olive et au 27e rang mondial.
(SOURCE : FRANCEAGRIMER 2022.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

OLEUROPÉINE Polyphénol contenu dans les feuilles de l'olivier, les olives et l'huile. Avec deux autres composés phénoliques, l'oléocanthal et l'hydroxytyrosol, il est responsable de leurs amertume et piquant.

LEVURES Champignons unicellulaires provoquant la fermentation des matières organiques animales ou végétales. Les levures servent à la fabrication du vin, de la bière, des alcools industriels, des pâtes levées et des antibiotiques.

PROBIOTIQUES Micro-organismes vivants bénéfiques au fonctionnement de notre organisme. Il s'agit essentiellement de bactéries (bifidobactéries…), mais aussi de levures (saccharomycètes).

certains industriels utilisent des olives immatures, encore vertes. Pour les noircir, ils les plongent dans une solution de gluconate ferreux (E579) qui change progressivement leur couleur par oxydation. À l'aspect lisse et brillant, elles portent alors la mention « olives noires confites ».

Elle est bonne pour le microbiote

Le saumurage permet la fermentation spontanée des olives sous l'action des **levures** (*Saccharomyces cerevisiae, Candida boidinii*, etc.) présentes naturellement sur le fruit, et des bactéries lactiques (*Lactobacillus plantarum, L. pentosus*), qui, grâce à leurs enzymes (bêta-glucosidase et estérase), permettent la désamérisation. Les levures sont aussi associées à la production de composés volatils (alcools, acétate d'éthyle et acétaldéhyde) qui améliorent le goût, l'arôme et les caractéristiques de conservation de cet aliment fermenté (3). En apportant des **probiotiques**, mais aussi des fibres (6,2 g/100 g d'olives noires), les olives de table participent à la bonne santé du microbiote intestinal.

Elle est riche en antioxydants

Au cours de la maturation, les teneurs en chlorophylle et en caroténoides antioxydants (principalement la lutéine suivie de béta-carotène) de l'olive verte diminuent peu à peu alors qu'augmente la synthèse de plusieurs anthocyanes (cyanidine 3-O-rutinoside et cyanidine 3-O-glucoside), des pigments antioxydants qui confèrent au fruit sa couleur violette puis noire (2).

Les olives fournissent aussi d'autres composés phénoliques (flavones, flavonols, acides phénoliques) dont l'hydroxytyrosol, qui diminue notamment la sécrétion de cytokines pro-inflammatoires (TNF-alpha, interleukines 6,12, etc.) (4). Les olives sont aussi bien pourvues en vitamine E (6 mg/100 g d'olives noires, 5 mg/100 g d'olives vertes), un autre antioxydant utile au développement du système nerveux. Par ailleurs, l'olive noire apporte du calcium (80 mg/100 g) et l'olive verte, de la vitamine K (14 microgrammes/100 g), nécessaire à la coagulation sanguine (5).

Elle est cardio-protectrice

L'un des principaux dérivés de l'olive, l'oleuropéine, participe au bon contrôle du métabolisme en favorisant la sécrétion d'insuline (6). En outre, la consommation de plus de 7 g (environ une demi-cuillère à soupe) d'huile d'olive par jour est associée à un risque plus faible de décès par maladies cardio-vasculaires (-19 %), par cancer (-17 %) et par maladies respiratoires (-18 %), selon une étude américaine menée auprès de 92 000 personnes (7), mais aussi du risque de décès par démence (-28 %), en améliorant la santé vasculaire, indépendamment de la qualité du régime alimentaire (8).

Bien choisir sa tapenade

Qu'elle soit verte ou noire, la tapenade est une dénomination réglementée qui ne peut pas être employée pour un autre ingrédient que l'olive. Elle doit impérativement être préparée à partir de 70 % minimum d'olives noires ou vertes, de 3 % de câpres, de 0,5 % d'anchois, d'huile d'olive exclusivement et de 5 % au maximum d'aromates. À ne pas confondre avec l'olivade, qui contient au minimum 50 % d'olives noires ou vertes et où l'utilisation d'additifs (émulsifiants, exhausteurs de goût, colorant, arômes, etc.) est admise (9). ■ **Sylvie Boistard**

PHILIPPE LEGRAND Directeur du Laboratoire de biochimie-nutrition humaine de l'Agrocampus-Inserm de Rennes

Les avantages de l'huile d'olive

« Les olives renferment beaucoup de lipides (15 à 17 g/100 g), principalement de l'acide oléique, un acide gras mono-insaturé de la famille des oméga-9. Il apporte majoritairement de l'énergie à l'organisme et participe à la fluidité des membranes cellulaires. Il a une action assez neutre sur les paramètres du risque cardio-vasculaire, mais il permet de rééquilibrer l'apport en graisses saturées et en oméga-6. L'intérêt de l'huile d'olive n'est donc pas centré sur les acides gras, mais sur sa forte teneur en antioxydants par rapport aux autres huiles végétales issues d'oléagineux. »

(1) FranceAgriMer, filière oléiculture, 2024.

(2) The Fate of Chlorophylls in Alkali-Treated Green Table Olives: A Review, Ambra R. et al, *Molecules*, 2023.

(3) Table Olives More than a Fermented Food, Perpetuini G. et al, *Foods*, 2020.

(4) Table olives and health: a review, Rocha J. et al, *Journal of Nutritional Science*, 2020.

(5) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(6) Olive component oleuropein promotes β-cell insulin secretion and protects β-cells from amylin amyloid induced cytotoxicity, Wu L. et al, *Biochemistry*, 2017.

(7) Consumption of Olive Oil and Risk of Total and Cause-Specific Mortality Among U.S. Adults, Guasch-Ferré M. et al, *Journal of the American College of Cardiology*, 2022.

(8) Consumption of Olive Oil and Diet Quality and Risk of Dementia-Related Death, Tessier A.J. et al, *Jama Network Open*, 2024.

(9) Code des pratiques loyales pour les olives de table, Fédération des industries condimentaires de France.

ANTOINE LORGNIER / HANS LUCAS.

La statue de Ramsès II est venue rejoindre le hall d'entrée du Grand Musée égyptien où elle accueille les visiteurs depuis octobre 2024. Haute de 11 mètres et pesant 99 tonnes, elle est à la mesure de ce bâtiment gigantesque qui attend plus de 10 000 visiteurs par jour.

Égypte

Un écrin majestueux pour la civilisation pharaonique

Le Grand Musée égyptien au Caire sera inauguré en fin d'année, avec dix ans de retard. Son ambition : être reconnu comme le « plus grand musée du monde », abritant notamment une aile entière dédiée au fabuleux trésor de Toutankhamon. Visite guidée de ce bâtiment hors norme et de son centre de recherche de pointe.

Par Sylvie Briet, envoyée spéciale

Ce sont les grandes pyramides qui surgissent d'abord au loin après une course folle pour parcourir la vingtaine de kilomètres qui séparent le centre du Caire de Gizeh. En attendant l'arrivée du métro, l'épreuve kamikaze du taxi demeure incontournable sur un périphérique de deux fois six voies, bordé d'une mince barrière que les piétons n'hésitent pas à enjamber. Au Caire, le seul code de la route est le coup de klaxon le plus fort. Le chaos soudain s'apaise pourtant, comme si Kheops et Khephren calmaient l'agitation de 2025 du haut de leurs millénaires. Avant de les atteindre, émerge des sables un bâtiment ultramoderne dont l'architecture évoque les monuments emblématiques de l'Égypte : le Grand Musée égyptien, le GEM.

Un musée pharaonique au sens premier du terme puisqu'il ne concerne que la civilisation antique des premières dynasties royales à l'époque gallo-romaine. Au sens physique ensuite, car il couvre au total 47 hectares (deux fois la surface du Louvre) et ses dimensions intérieures sont conçues pour accueillir les monuments antiques. Annoncée pour le 3 juillet, l'inauguration du GEM devrait se faire en fin d'année avec un retard, lui aussi colossal, de dix années. Une immense esplanade très minérale l'entoure, ornée d'un obélisque de 16 mètres de haut, datant de l'époque de Ramsès II. Pour la traverser, mieux vaut emprunter une des voiturettes avec chauffeur mises à disposition, surtout lorsque la température dépasse les 35 °C. Le bâtiment, conçu par un cabinet d'architecture irlandais, décline des pyramides en panneaux d'albâtre sur sa façade, ornée de car- ▸

touches désignant 25 pharaons. Le hall d'entrée ou atrium coupe le souffle et renverrait la pyramide du Louvre au rang de gadget. On cherche en vain les angles droits dans cet espace dont la hauteur atteint jusqu'à 30 mètres. Tout évoque les pyramides, des obliques défient les lois de la pesanteur, et les piliers en forme de triangles inversés flottent, aériens.

HENRIQUE CAMPOS/HANS LUCAS VIA AFP

Un long voyage à travers 4000 ans d'histoire

Très loin, très haut, le plafond laisse passer une lumière du jour tamisée. Dès l'entrée, la statue colossale de Ramsès II, découverte en 1854 à Memphis, première capitale de l'Égypte ancienne située au sud du Caire actuel, s'impose en majesté du haut de ses 11 mètres et 99 tonnes. Nasser l'avait fait installer en 1954 au centre-ville, sur la place de la gare Ramsès, pour renforcer l'identité nationale. Elle a résisté vaillamment alors qu'au milieu des routes et autoponts embouteillés, entre pollution et vents du désert, personne ne la voyait. De cet atrium part « le grand escalier ». Terme sobre pour désigner une des réalisations les plus spectaculaires du musée qui couvre 6000 m². À mesure que l'on grimpe les 108 marches —ou que l'on emprunte l'escalier mécanique sur le côté —, défilent statues, sarcophages, pyramides, colonnes, ordonnés selon quatre thèmes : l'image royale, la maison divine, les dieux et le concept d'éternité. *« Ici, les visiteurs expérimentent l'élégance et la grandeur des temps anciens, ils voyagent vers l'éternité à travers un design moderne,* explique Ahmed Ghoneim, dernier directeur en date, nommé en octobre 2024, qui vante sans modestie le musée dont il a hérité. *L'architecture et le design en font une institution unique en son genre.* » Difficile de lui donner tort. La montée des marches se termine devant une baie vitrée offrant une vue imprenable sur les pyramides situées à 2 kilomètres de là.

L'aile Toutankhamon, future star du Grand Musée égyptien

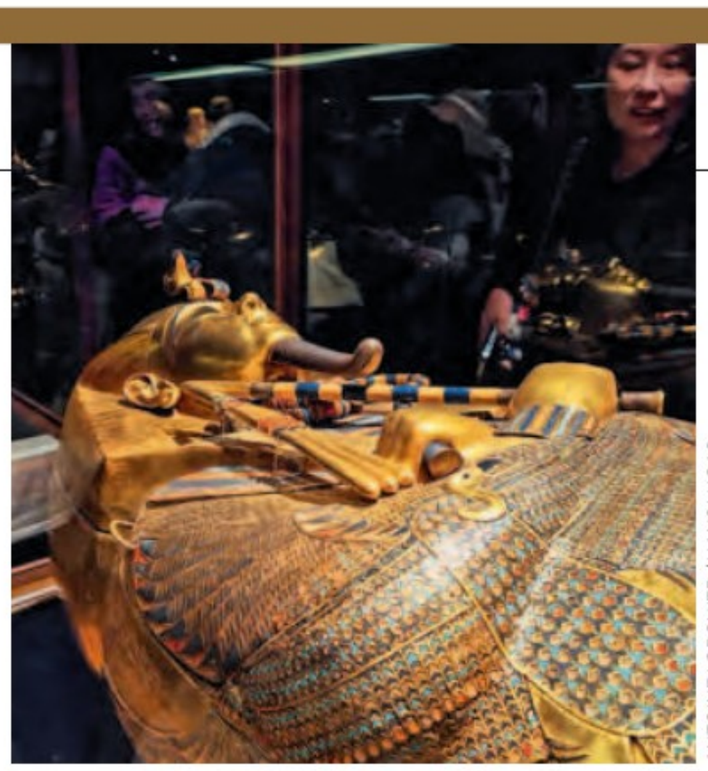
Encore inaccessible, une aile entière du bâtiment est réservée à Toutankhamon. Elle présentera pour la première fois les 5644 objets découverts dans la tombe par Howard Carter en 1922. Tous ont été traités, répertoriés, restaurés si besoin dans le centre de conservation adjacent au musée (*lire p. 110*). Cette galerie, pensée comme une tombe, en restitue l'ambiance. Elle sera la star du GEM, car pour les Égyptiens, si les touristes vont voir *la Joconde* à Paris, ils iront voir Toutankhamon au Caire. Autre moment fort de la visite du musée : une aile conçue spécialement pour accueillir la première barque de Kheops longue de 43 mètres.
Sur la gauche, les 12 galeries, ouvertes, elles, depuis octobre dernier, se consacrent chacune à une époque et

CONTEXTE

L'enquête impossible

Combien de fois *Sciences et Avenir* vous a-t-il proposé des reportages, des dossiers, des hors-séries consacrés à l'Égypte ? Si aujourd'hui ces sujets sont devenus rares, c'est que se rendre sur place est devenu extraordinairement difficile pour un journaliste. Même pour visiter un musée qui n'a rien de secret. Il a fallu une accréditation officielle des autorités pour interviewer des conservateurs. Deux mois de démarches quasi quotidiennes auprès de l'ambassade d'Égypte, du Centre international de la presse au Caire et du GEM, qui exigent même les questions à l'avance ! Sans l'accréditation, les membres du musée ont interdiction de parler. Malgré un report du voyage d'un mois, notre envoyée spéciale n'a réussi à l'obtenir qu'une fois sur place. Un succès que nous n'avions pas connu l'an passé pour accompagner des archéologues français sur un champ de fouilles. M. N.

Situé à 2 km des pyramides de Gizeh dont il offre une vue magistrale (à gauche), le GEM accueillera dans une salle dédiée le trésor de Toutankhamon (ci-contre, son sarcophage). Ci-dessous, une vue nocturne de l'immense esplanade entourant le musée, ornée d'un obélisque de 16 m de haut datant de l'époque de Ramsès II.



ANTOINE LORGNIER/HANS LUCAS.

LUDOVIC MARIN/POOL/ABACAPRESS.COM

un thème, société, royauté ou croyances. Les 15 000 œuvres exposées offrent un long voyage à travers 4000 ans d'histoire, organisé chronologiquement. Les premières dynasties n'ont rien à envier aux suivantes, même si les noms des rois et dignitaires de cette époque reculée restent obscurs. Le mobilier funéraire de Hétéphérès, reine de la IVe dynastie, épouse (ou concubine) de Snéfrou, mère de Kheops, en donne un bel exemple. Sa tombe a été découverte sur le plateau de Gizeh en 1925 par l'équipe américaine de George Reisner. Une cachette a livré bijoux, vaisselle, vases canopes, fauteuil, lit en bois doré, tous témoignant du luxe et de la finesse artistique qui existait déjà vers 2600 avant notre ère, soit 1300 ans avant Toutankhamon (1345-1327 avant notre ère).

Au fil des salles, les chefs-d'œuvre se succèdent jusqu'à épuisement, l'objectif est clairement de séduire le plus grand nombre, les cartels et panneaux restant très généralisants, au détriment de mises en contexte précises. Mais le charme opère. Ici, une perruque de cheveux humains datée de 1100 avant notre ère, là, les tablettes sur lesquelles écrivaient les écoliers durant la période gréco-romaine… Ces galeries font la fierté de Miral Mahmoud et Jasmine Mohamed, deux jeunes archéologues conservatrices qui travaillent au GEM depuis 2015. Miral, formée à l'université d'Assiout, a participé aux fouilles françaises de Saqqarah. Elle a rejoint les réserves et le centre de conservation alors que le musée n'était pas encore sorti de terre : *« Ici, c'était du sable »*, se souvient-elle. Avec une centaine de collègues, elle a travaillé dix années à enregistrer, décrire, documenter chaque objet, et toutes deux se sont formées sur place, mais aussi en France. *« Nous nous posions la question : que mettre dans chaque vitrine ?,* raconte Jasmine Mohamed, qui a étudié l'histoire de l'art à l'université du Caire. *Pour Toutankhamon par exemple, nous avons organisé trois conférences internationales afin de discuter avec les spécialistes des objets exposés et de leur présentation. Nous avons abordé les défis liés au transfert des pièces monumentales.* »

47 ha
La surface totale occupée par le GEM (470 000 m²).

93 000 m²
La surface des expositions.

1,1 milliard d'euros
Le coût de la construction du GEM.

Des œuvres récupérées dans tous les musées du pays

Les équipes ont récupéré des œuvres dans tous les musées du pays, comme ceux de Charm el-Cheikh ou de Louxor, au grand dam de leurs conservateurs respectifs. Mais la plupart des objets, dont beaucoup sont exposés pour la première fois, dormaient dans les réserves du vieux musée de la place Tahrir, le Musée égyptien du Caire. Inauguré en 1902, il avait lui-même accueilli les collections d'un musée du quartier de Boulaq, créé par Auguste Mariette à l'époque où l'égyptologie était essentiellement française. Poussiéreux à souhait, le musée de Tahrir a dû se séparer de Toutankhamon et de la plupart de ses réserves, qui étaient de toutes façons invisibles. Aujourd'hui, ses vitrines sont sales ou mal éclairées, mais le vieux bâtiment possède encore de beaux atours et beaucoup de charme. Notamment un trésor peu connu, aussi beau que celui de Toutankhamon selon les spécialistes, découvert dans les années 1940 par l'archéologue français Pierre Montet dans la nécropole de Tanis, dans le delta du Nil. Il comprend les bijoux des rois régnant vers 1000 avant notre ère et le sarcophage en argent de Psousennès Ier, un métal plus rare et plus cher que l'or à l'époque en Égypte.

Conçu pour remplacer le musée de la place Tahrir (qui continuera à exister), le GEM a résolument choisi la modernité, même s'il affiche déjà une histoire de trente ans ! Le projet date en effet des années 1990, du temps d'Hosni Moubarak et de sa femme Suzanne. Au terme ▶

CONSERVATION

19 laboratoires spécialisés dans la restauration des trésors de l'Égypte antique

Le Grand Musée égyptien abrite aussi des réserves pouvant accueillir plus de 100 000 objets et un centre de conservation ultramoderne.

Le prestigieux centre de conservation du GEM, c'est Fort Knox: contrôles de sécurité draconiens, systèmes d'alarme, portes blindées, codes… Ici arrivent et sont stockés tous les trésors de l'Égypte ancienne, les réserves pouvant accueillir plus de 100 000 objets.
120 conservateurs et 89 archéologues travaillent dans ce centre ouvert en 2010, bien avant le musée. Chacun de ses 19 laboratoires est spécialisé dans un matériau particulier — bois, papyrus, pierre monumentale, céramiques, bijoux… —, et exhale sa propre atmosphère clinique, ultramoderne avec sa température, son taux d'humidité et son matériel dernier cri. Imagerie multispectrale, microscopie électronique, spectroscopie, diffraction des rayons X, scanners à haute résolution font parler chaque objet: de la composition des dessous de Toutankhamon à la reconstitution d'éventails et de colliers, en passant par la couleur des taches des vaches célestes peintes sur le lit funéraire du jeune roi que l'on croyait noires, alors qu'elles étaient bleues.
Dans la salle des papyrus, deux conservateurs s'affairent autour d'un des précieux parchemins posés sur une table d'opération. Il a fallu six mois pour déplier ses deux mètres de longueur pour éviter qu'il ne se détériore. Plus loin, un laboratoire immense aligne des dizaines de somptueux sarcophages, sur lesquels des spécialistes agissent en orfèvre pour retrouver un dessin ou une couleur.
« Nous employons des techniques non invasives, explique Hussein Kamal, le directeur du centre de conservation. *Depuis 2010, 57 000 objets sont passés ici : nous les nettoyons, nous les analysons, nous menons des traitements préventifs pour qu'ils ne se détériorent pas. Et nous conservons toutes les informations recueillies dans une banque de données.* » Les découvertes sont nombreuses, dévoilées au fur et à mesure. Comme celle publiée en 2024 dans *Journal of the General Union for Arab Archaeologists* et dont Hussein Kamal est cosignataire, concernant l'impressionnante armure de Toutankhamon, un objet rare, très détérioré par les traitements infligés à l'époque d'Howard Carter. Les chercheurs égyptiens ont étudié et reconstitué la fabrication de l'armure, montré l'agencement des bandes de cuir reliées aux couches de lin, offrant une élasticité et une résistance surprenantes. Et contrairement à plusieurs hypothèses, aucune trace de sang ou même d'impact n'a touché l'armure qui n'a jamais été utilisée dans un combat. Ces études sont menées avec de nombreuses équipes d'autres pays, au premier rang desquels les Japonais, qui nouent des partenariats avec le GEM depuis presque vingt ans.

PHILIPPE BOURSEILLER

Nettoyage d'une parure (en haut) **et restauration** d'une boîte (en bas), provenant toutes deux de la tombe de Toutankhamon, au centre de conservation du GEM.

d'un appel d'offres remporté en 2003 par l'agence irlandaise Heneghan-Peng, le premier coup de pelle du chantier est donné en 2005. La révolution de 2011 met fin aux trente ans de règne de Moubarak. Les élections qui suivent placent au pouvoir les Frères musulmans, stoppés en 2013 par un coup d'État militaire du général Sissi, toujours aux commandes de l'Égypte. Une entreprise égyptienne et le ministère de la Défense reprennent le projet du GEM en 2015. Il faut néanmoins trouver d'autres financements pour assouvir le puits sans fonds du chantier. Estimé à ses débuts à 550 millions de dollars, son coût a largement dépassé le milliard. Les Japonais prêtent une énorme somme (800 millions de dollars), une exposition internationale sur Toutankhamon (Los Angeles, Paris, Sydney…) est organisée pour renflouer les caisses en 2019, mais les ennuis se poursuivent : le Covid-19 stoppe une nouvelle fois le chantier en 2020 ; la chute du tourisme, la crise économique et peut-être la folie des grandeurs du projet obligent à reporter sans cesse une ouverture annoncée tous les six mois depuis 2022. Aujourd'hui, l'enjeu est crucial pour le gouvernement : le GEM est une affaire d'État, traitée directement au plus haut niveau. Il y va en effet de l'honneur national et accessoirement des finances publiques. Le directeur actuel Ahmed Ghoneim, économiste de formation, affiche des ambitions… très élevées : *« L'objectif du GEM est de potentiellement devenir le musée le plus important du monde, le "musée des musées", à la fois héritage culturel et centre de recherches et d'éducation scientifiques. Il jouera également un rôle clé dans les relations diplomatiques, en recevant des délégations étrangères et nous y organiserons des événements internationaux. »*

> « L'objectif du GEM est de potentiellement devenir le musée le plus important du monde, le "musée des musées" »
> **Ahmed Ghoneim,** directeur du Grand Musée égyptien, au Caire

Des infrastructures touristiques à la mesure

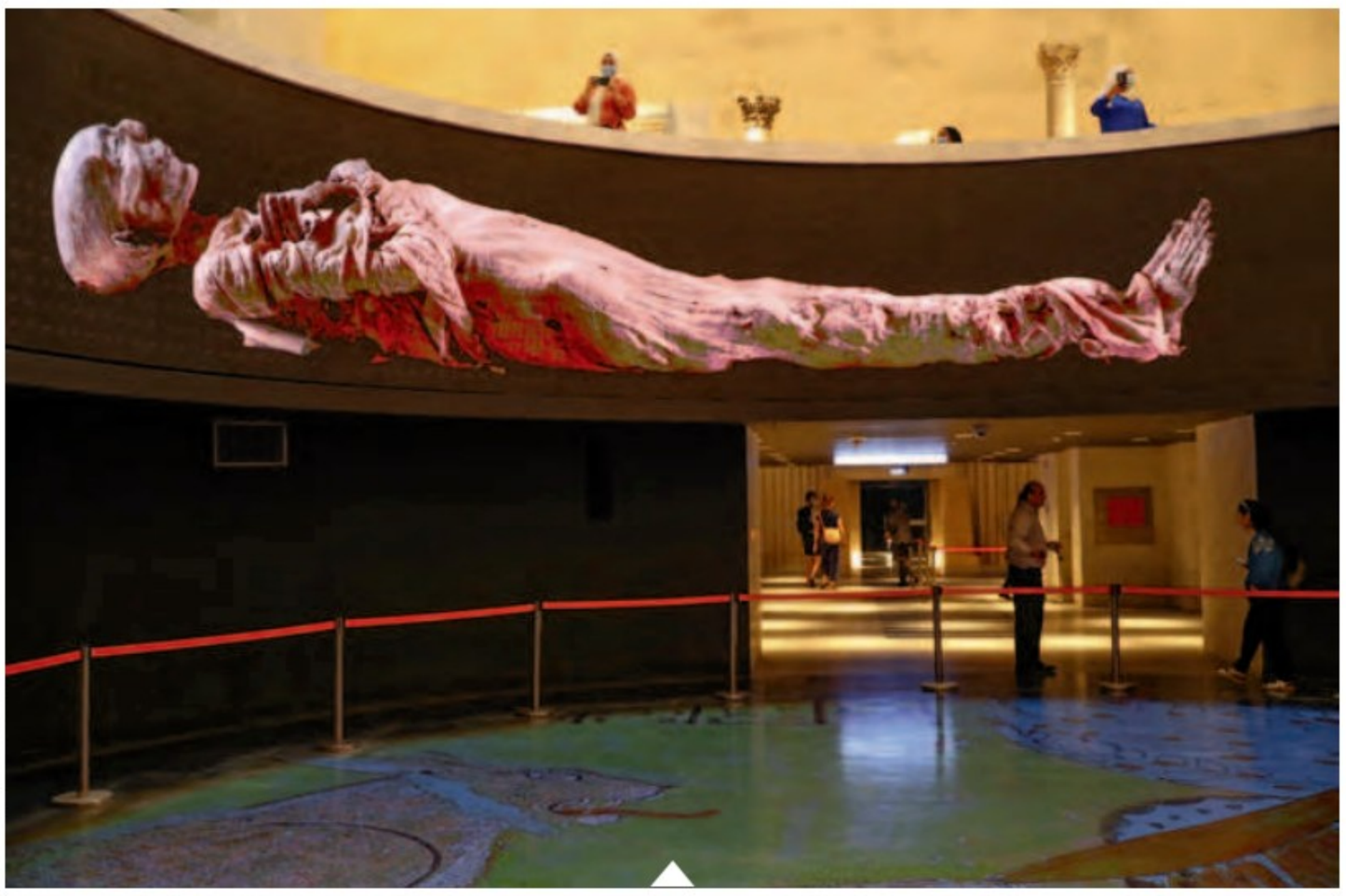
Sur place, la dimension économique et commerciale du musée n'est pas négligeable. À l'intérieur, des galeries du rez-de-chaussée accueillent restaurants et boutiques de luxe. À l'extérieur, une deuxième esplanade est réservée à des salons d'entreprises. Un nouvel aéroport « Sphinx », situé non loin de Gizeh, a ouvert récemment pour convoyer directement les touristes sur place. Et les visiteurs VIP suffisamment riches pourront assister, moyennant 400 dollars (au lieu des 2000 initialement prévus !), à la restauration de la seconde barque solaire de Kheops, très abîmée, menée par une équipe égypto-japonaise.

Le GEM symbolise donc une autre Égypte qui a entouré son passé d'un écrin moderne, magnifique et lisse. Aux antipodes d'une autre réalité, dure et chaleureuse, incarnée par le tumulte des routes et la résilience des automobilistes du Caire. ■

MOMIES

L'autre musée du Caire

On se souvient de la grande parade des momies organisée en grande pompe au Caire en avril 2021 : 22 tanks avaient transporté les rois et reines de l'Égypte antique pour les amener du musée de la place Tahrir au Musée national de la civilisation égyptienne (NMEC), un splendide musée moderne situé au sud de la ville, ouvert en 2021. Il abrite donc en son sous-sol les momies de 17 pharaons et trois reines, les lignées de Ramsès, Thoutmosis, Séthi…, impressionnantes de présence. Les deux musées se veulent complémentaires, le directeur du NMEC El Tayeb Abbas, égyptologue, étant auparavant à la tête du GEM. Il a élargi son champ d'action : *« Ici nous présentons toute l'histoire de l'Égypte jusqu'à nos jours, avec des œuvres choisies en fonction de l'histoire qu'elles racontent. »*



SUI XIANKAI/XINHUA-REA

La salle des momies royales, au Musée national de la civilisation égyptienne, au Caire, abrite, depuis 2021, 17 momies de rois et 3 momies de reines de l'Antiquité égyptienne.

FRANCESCO D'ERRICO
ANTHROPOLOGUE, DIRECTEUR DE RECHERCHE CNRS

« Le corps est un objet culturel depuis plus de 500 000 ans »

Vêtements, coiffures, parures, mais aussi tatouages, scarifications… autant de pratiques qui sont devenues au fil de l'histoire un moyen d'expression identitaire. Entretien avec un spécialiste des comportements symboliques.

Qu'est-ce que la culturalisation des corps, sujet que vous aborderez au festival d'Avignon lors de la 12e Rencontre recherche et création ?
Elle désigne l'ensemble des processus par lesquels les individus et les sociétés modifient, transforment ou marquent le corps — directement ou à travers des artefacts comme les vêtements — afin de répondre à des besoins adaptatifs, sociaux, symboliques ou identitaires. Depuis la préhistoire, ces pratiques expriment des valeurs culturelles, des normes collectives, et des choix individuels. Ils vont de la simple protection contre les éléments à des formes élaborées de communication sociale.

Sous votre regard d'anthropologue, la mode, les bijoux, les tatouages s'inscrivent dans un parcours multimillénaire et identitaire…
Effectivement. Ces pratiques incluent des modifications temporaires comme les vêtements, la peinture corporelle, les parures, les coiffures ou les broderies, mais aussi des transformations permanentes : tatouages, scarifications, perçages, implants, modifications dentaires ou génitales, remodelage du crâne

BRENT STIRTON

Francesco d'Errico est directeur de recherche CNRS au laboratoire Pacea (De la préhistoire à l'actuel : culture, environnement, anthropologie) et professeur à l'université de Bergen (Norvège).

PARTENARIAT SCIENCES ET AVENIR

« La traversée des secrets » au festival d'Avignon

Le festival d'Avignon et l'Agence nationale de la recherche (ANR) organisent la 12e édition des Rencontres recherche et création sur le thème « La traversée des secrets », en partenariat avec *Sciences et Avenir*, les 10 et 11 juillet. Programme et inscription : **www.recherche-creation-avignon.fr**

réservé à certaines élites, voire amputations à finalité non thérapeutique. Ce sont autant de formes d'expression culturelle du corps.

Leur première utilité serait de permettre au membre d'un groupe de se distinguer des membres des autres groupes ?
Les innovations comme les vêtements sont nées de la nécessité de s'adapter à des environnements exigeants. Mais très tôt, elles ont dépassé la simple fonction utilitaire pour devenir un moyen d'expression identitaire. Se distinguer des autres groupes, ou affirmer son appartenance à un sous-groupe, passe souvent par des marques portées sur le corps. C'est une forme d'affichage identitaire essentielle à la vie sociale.

Et cela répondrait à une attente sociale ?
Avant même toute modification corporelle, le corps humain est déjà un marqueur social : il incarne des normes liées au genre, à l'âge, à la hiérarchie ou à l'appartenance communautaire. Dans certaines sociétés traditionnelles que j'ai étudiées en Afrique, ces normes sont

exprimées de manière explicite : ainsi, dans un groupe, en combinant l'utilisation d'ocre et différents vêtements et coiffures, des femmes expriment leur appartenance à une société mais aussi si elles sont fiancées ou mariées. Ailleurs, des jeunes hommes doivent se faire arracher les incisives sous peine de ne pas être reconnus comme membres à part entière de leur communauté.

Quel est votre regard sur l'Occident d'aujourd'hui ?

Même dans nos sociétés contemporaines, les corps restent codifiés. L'adolescence, par exemple, impose ses propres « uniformes », parfois très subtils. On observe une pluralité de groupes sociaux — familiaux, régionaux, religieux, ethniques, économiques — qui imposent des normes corporelles explicites ou implicites, et au sein desquels chacun tente, tant bien que mal, de ménager un espace d'expression personnelle. Le tatouage en est un bon exemple : il est passé d'un marqueur marginal (réservé à certaines minorités, comme les marins ayant franchi le cap Horn) à un véritable outil d'expression artistique personnelle. Mais la tendance évolue : aux États-Unis, les dépenses liées à l'effacement des tatouages augmentent plus rapidement que celles pour les réaliser !

« Se distinguer des autres groupes, ou affirmer son appartenance à un sous-groupe, passe souvent par des marques portées sur le corps »

Le phénomène a des racines plus anciennes qu'on ne le pensait ?

Ce phénomène n'est pas le fruit d'une rupture brutale entre « humains archaïques » et « humains modernes ». Il s'inscrit dans une lente trajectoire évolutive qui débute il y a au moins 500 000 ans. Les hominines ont vraisemblablement perdu leur fourrure il y a environ 2 millions d'années, développant une peau foncée comme adaptation aux milieux ouverts d'Afrique et à un rayonnement UV intense. À partir de quand certains ont commencé à modifier délibérément leur apparence corporelle, c'est-à-dire culturellement ? Cela reste une question ouverte et probablement liée à notre première sortie d'Afrique, autour de -1,5 million d'années, qui nous a conduits à coloniser une grande variété d'environnements en Europe et en Asie. ■

Propos recueillis par Rachel Fléaux

Université de Limoges

HQC : une avancée majeure à l'université de Limoges en matière de cybersécurité post-quantique

Une équipe de chercheurs du laboratoire Xlim (CNRS/Université de Limoges), en collaboration avec l'Institut de mathématiques de Bordeaux (CNRS/Université de Bordeaux/Bordeaux INP), vient d'être sélectionnée par le National Institute of Standards and Technology (NIST) pour son projet HQC comme second standard de chiffrement post-quantique.

Dit en des termes plus clairs, il est acquis désormais que si une faille était découverte dans le ML-KEM, le système qui garantit la sécurité des échanges des données dans le monde dès lors que deux parties communiquent sur un canal public, par exemple lors d'échanges entre un client et sa banque en ligne ou lors d'une transaction commerciale par internet, c'est bien HQC, une production originelle de l'Université de Limoges/Université de Bordeaux puis ensuite développée avec une équipe internationale mais essentiellement française, qui prendrait le relais pour continuer à sécuriser nos données.

Le choix de HQC vient clôturer un long processus de standardisation débuté en 2017 avec 82 soumissions, dont 69 étaient déclarées recevables. Parmi ces 69 soumissions, 8 d'entre elles impliquaient Philippe Gaborit, professeur à l'Université de Limoges, au sein du laboratoire Xlim, et ses collaborateurs de l'équipe CRYPTIS, qui bénéficie d'une expertise de plus de 25 ans sur les codes correcteurs d'erreurs au cœur des thématiques post-quantiques.

Cryptographie post-quantique : enjeux d'avenir et standardisation

La cryptographie post-quantique vise à anticiper les risques de sécurité et à concevoir des systèmes cryptographiques capables de résister aussi bien aux attaques des ordinateurs classiques qu'aux ordinateurs quantiques, tout en restant compatibles avec les protocoles et infrastructures existants.

À ce jour, la cryptographie se fonde principalement sur la théorie des nombres, en l'occurrence la factorisation ou le logarithme discret. Elle est plus que robuste pour les ordinateurs classiques. Par exemple, il faudrait des millions d'années à un ordinateur classique pour factoriser un nombre de 600 chiffres. Pas de risques rationnels d'insécurité aujourd'hui donc. Néanmoins cette donne pourrait radicalement changer dans les années à venir, avec l'avènement potentiel des ordinateurs quantiques qui auraient la capacité de casser complètement tous les systèmes cryptographiques actuels et donc de remettre en cause la sécurité globale de toutes nos communications et en particulier du commerce élèctronique mondial. Si ces risques ne sont pas concrets aujourd'hui, ils doivent être anticipés sérieusement, c'était le but du processus de standardisation du NIST. Le protocole HQC, dans cette perspective, apparaît plus qu'un simple résultat de recherche ; c'est un véritable enjeu pour l'avenir.

Giordano Bruno, un regard sur l'infini

Le dominicain italien a apporté une vision innovante de la cosmologie au XVIe siècle en complètant la théorie de Copernic sur l'héliocentrisme et en affirmant l'infinité de l'Univers et l'infinité des mondes. Après sa mort sur le bûcher en 1600, la postérité en fit une figure du combat entre science et foi.

Par Eve-Aline Dubois

Avez-vous déjà entendu parler de Giordano Bruno ? Certains ont vu sa statue au Campo dei Fiori à Rome (Italie), où l'Inquisition le condamna au bûcher, tandis que d'autres perçoivent ce personnage historique comme un précurseur de Galilée. Mais son parcours et la façon dont il a inspiré la science moderne sont souvent méconnus. Il est né en 1548 à Nola, près de Naples qui appartient alors au royaume d'Espagne. Son prénom de baptême est d'ailleurs Filippo, comme le roi espagnol. Très jeune, il montre des capacités intellectuelles impressionnantes et va se former au couvent dominicain San Domenico Maggiore, à Naples, où il deviendra novice. Lors de son ordination, il prendra le nom de frère Giordano, appellation qu'il ne quittera plus.

Giordano Bruno fait montre d'une excellente mémoire et se fait remarquer pour son intelligence vive et mordante. Au début de son noviciat, il est néanmoins rappelé à l'ordre pour ses positions extrêmes telles que le refus des icônes et du culte des saints. Cette rigueur aurait pu être accueillie comme un signe de ferveur, mais en ces temps de Contre-Réforme cela ressemble trop à du protestantisme.

Alors qu'il va avoir 30 ans, il est inquiété par un procès interne au sein de l'ordre des dominicains.

CHRISTOPHE SWUSEN UNAMUR

Eve-Aline Dubois
est philosophe de la cosmologie à l'université de Namur (Belgique).

Il décide de fuir et commence une longue période d'errance. Il traversera l'Italie, gagnant sa vie en donnant des cours. Et il arrivera à Genève en espérant que les calvinistes feront preuve d'une plus grande ouverture d'esprit que ses coreligionnaires. Il y apprend le métier d'imprimeur, corrige des épreuves, et profite de ses connexions dans le monde de l'impression pour éditer un pamphlet sur un aristotélicien genevois. Cette publication lui vaudra un emprisonnement, un procès, une excommunication puis un nouvel exil.

Il se rend alors en France, enseigne quelque temps à Toulouse avant de rejoindre la cour d'Henri III. Il semblerait que le dominicain avait un fort caractère et n'avait pas toutes les qualités requises pour se faire — ni garder — des amis. Henri III l'éloigne donc en l'envoyant en Angleterre avec son ambassadeur Michel de Castelnau. Mais il se fâche avec les érudits d'Oxford, se retire dans l'ambassade et y rédige, en 1584, trois ouvrages qui fondent sa pensée cosmologique : *Le Banquet des cendres* ; *De la cause, du principe et de l'un* ; et *De l'infini, de l'univers et des mondes*. Giordano Bruno y défend une conception du monde avant-gardiste. Il se détache des enseignements théologiques et ne se prétend pas scientifique, ce qui aurait peu de sens au XVIe siècle. Il parle du monde en philosophe

PIERRE ROCHON / ALAMY / PHOTO12

Giordano Bruno anticipe la possibilité de systèmes planétaires extrasolaires. Et il évoque même les habitants de ces autres mondes

Philosophe et théologien, Giordano Bruno (1548-1600) défend très tôt une conception du monde avant-gardiste (statue érigée sur le Campo dei Fiori, à Rome).

mais augure la science moderne. Le Napolitain est notamment un farouche défenseur de l'héliocentrisme copernicien. Dans *De Revolutionibus orbium coelestium* (1543), Nicolas Copernic avait proposé une modélisation du monde avec les planètes en rotation autour du Soleil. Ce qui allait à l'encontre du modèle jusqu'alors dominant présenté dans l'*Almageste* de Ptolémée, où la Terre est placée au centre du monde. Dans *Le Banquet des cendres*, Giordano Bruno développe ainsi un argumentaire en faveur de Nicolas Copernic en accusant les savants d'Oxford de s'être contentés de n'en avoir lu que la préface et de ne pas avoir saisi l'importance de ce texte.

Il ajoute trois notions majeures à l'héliocentrisme copernicien

Mais il va plus loin que Nicolas Copernic en ajoutant à l'héliocentrisme trois notions majeures. Premièrement : la fin des sphères cristallines. Selon lui, les planètes et les étoiles ne sont pas portées par des sphères solides et transparentes qui les mettraient en mouvement, mais réparties dans l'espace à différentes distances de notre regard d'observateur terrestre. Cette idée de sphères, qui représentent bien plus que la modélisation abstraite d'une orbite circulaire, est alors profondément ancrée dans le modèle astronomique. Or, avec les observations de comète enregistrées par Tycho Brahe en 1577, cette idée ne tient plus : les comètes traversant ces sphères, celles-ci ne peuvent plus avoir de réalité physique.

Deuxième ajout : l'infinité de l'espace. L'idée de sphère étant abandonnée, il semble inutile de placer les étoiles à égale distance du Soleil. On écarte ainsi l'idée d'un monde clos, contenu dans la sphère des étoiles fixes. On peut donc les distribuer aléatoirement dans un espace qui n'a plus l'obligation d'être fini. Et puisque cet espace est infini, il y a une infinité d'étoiles réparties dans cette immensité. Enfin, Giordano Bruno défend l'idée que les étoiles sont comme le Soleil et celui-ci est comme une étoile. Les étoiles et le Soleil sont autant d'astres lumineux qui peuvent être entourés d'une cour d'astres sombres comme la Terre. Giordano Bruno anticipe ainsi la possibilité de systèmes planétaires extrasolaires. Et il évoque même les habitants de ces autres mondes.

Le philosophe affirme donc à la fois l'infinité de l'Univers et l'infinité des mondes. S'il semble précurseur dans ce domaine, on n'est jamais vraiment le premier à penser quoi que ce soit. On est toujours l'héritier d'une tradition, influencé par son époque et baigné dans une culture. Giordano Bruno ne déroge pas à cette règle. La question de l'infinité du monde a traversé en effet les âges et les courants de pensée philosophiques et théologiques. Pendant le Moyen Âge, la question a resurgi avec la redécouverte des textes antiques qu'il a fallu articuler avec le dogme chrétien. La question se pose alors de la possibilité de concevoir un espace infini. Cette problématique est notamment débattue alors que l'université s'empare des textes et de leurs interprétations par Thomas d'Aquin qui permet une lecture chrétienne d'Aristote.

Nicolas de Cues, théologien du XV^e^ siècle, énoncera dans la *Docte ignorance* une sentence qui inspirera grandement Giordano Bruno : *« L'Univers est une sphère infinie dont le centre est partout et la circonférence nulle part. »* Cela semble dire que l'Univers est infini. Mais d'où vient cette phrase ? Elle découle d'une tradition multiséculaire que l'on peut faire remonter à l'ouvrage dit des *24 philosophes*, recueil anonyme dont la date de rédaction est également incertaine, donnant 24 définitions de la déité. La deuxième est la plus intéressante pour notre propos : *« Dieu est une sphère illimitée dont le centre est partout et la circonférence nulle part. »* Ainsi, le saut de pensée le plus impressionnant concernant l'infinité de l'Univers serait dû à Nicolas de Cues. Ce dernier, en associant l'Univers à la personne de Dieu, transfère l'attribut d'infinitude à l'Univers, idée reprise par Giordano Bruno. Mais le penseur dominicain va plus loin que Nicolas de Cues : dans son œuvre, l'Univers infini ne repose plus sur les qualités d'un dieu extérieur au monde qui en assure la cohérence.

DARCHIVIO/OPALE.PHOTO/LEEXTRA

Arrêté par l'Inquisition en 1592, Giordano Bruno sera brûlé vif à l'issue d'un procès qui aura duré huit ans, après avoir été accusé de blasphème et d'hérésie.

Le Soleil est déclassé pour n'être qu'une étoile parmi d'autres

Pour ce qui est de la répartition des étoiles au travers de cet espace infini, Giordano Bruno n'est pas non plus le premier à briser les sphères du monde. En effet, en 1576, l'astronome britannique Thomas Digges republie un almanach rédigé par son père, Leonard Digges ; il en profite pour y ajouter un commentaire sur le *De Revolutionibus orbium coelestium* de Nicolas Copernic, où il défend un héliocentrisme dépourvu de sphère des fixes. Si les planètes ont bien des orbites circulaires autour du Soleil, les étoiles sont, quant à elles, réparties de manière aléatoire dans l'espace. Pour Giordano Bruno, les étoiles sont cependant autant de soleils répartis dans l'Univers. Après que la Terre a été délogée du centre du monde pour y placer le Soleil, l'astre du jour est donc à son tour déclassé pour n'être qu'une étoile parmi d'autres. Notre bout du monde n'a d'autre particularité que d'être notre demeure.

Giordano Bruno abolit par ailleurs la distinction aristotélicienne entre les mondes sublunaire et supralunaire. Selon lui, l'Univers est uniformément constitué des quatre éléments (terre, eau, air, feu), les objets ne se distinguant que par la proportion de ces éléments dans leur composition. Par exemple, les étoiles qui brillent au firmament sont principalement constituées de feu, alors que les planètes, qui ne font que réfléchir la lumière de leur étoile, sont surtout constituées d'eau.

Enfin, le dominicain conçoit l'Univers comme étant animé d'une âme. Les habitants de ce monde sont chacun dotés d'une âme qui, à leur décès, rejoindra celle de l'Univers avant de réintégrer un autre corps. Giordano Bruno pense donc la réincarnation possible ainsi que le fait de revivre en tant qu'habitant d'un autre monde, sur une autre planète autour d'une autre étoile. ■

DÉCRYPTAGE

Giordano Bruno n'est pas un premier Galilée

Le personnage de Giordano Bruno a souvent été romancé, et il est devenu, malgré lui, une figure du combat entre science et foi, notamment à la Révolution française. Son procès, qui lui coûta huit ans d'emprisonnement et le bûcher en 1600, est souvent comparé à celui de Galilée, dont Giordano Bruno est présenté comme un précurseur. Mais l'unique point commun réside en la personne du cardinal Bellarmin, qui prit dans les deux cas une part active. Les deux affaires sont en effet fondamentalement différentes. Giordano Bruno, frère dominicain apostat, est accusé de blasphème, et la plupart de ses chefs d'accusation portent sur le dogme et des questions théologiques, comme le rôle des saints ou la virginité de la mère du Christ. Il ne défend pas une position scientifique mais une liberté de parole philosophique. Galilée adopte pour sa part une position de scientifique, alors appelé philosophe de la nature. En tant que laïc, il n'est pas soumis de la même manière que Giordano Bruno au pouvoir de l'Église. Les accusations retenues contre Galilée ne sont donc pas religieuses mais relatives à sa conception du monde.

C2RMF - ALEXIS KOMENDA

Les débris de Notre-Dame déblayés après l'incendie du 15 avril 2019 ont été provisoirement entreposés sous des barnums installés sur le parvis avant de pouvoir les stocker dans un espace adapté, en banlieue parisienne.

Le grand tri des vestiges de Notre-Dame de Paris

Extraits de la cathédrale incendiée, des milliers d'éléments en pierre ou en bois endommagés sont stockés dans un immense entrepôt. Des conservateurs s'emploient à les répertorier et les trier en fonction de leur intérêt.

Enclavé dans une zone industrielle de la banlieue parisienne, le bâtiment rectangulaire ressemble à n'importe quel hangar de stockage. Ce qu'il renferme est pourtant bien loin des marchandises pour lesquelles ces lieux ont été pensés. À l'abri des regards, dans un espace presque aussi vaste qu'un hall de gare, des dizaines de milliers de « morceaux » de Notre-Dame de Paris reposent de façon méthodique sur des étagères métalliques. Ces morceaux, ce sont bien sûr ceux de la flèche, de la charpente médiévale et de plusieurs voûtes, tombés lors de l'incendie qui ravagea la cathédrale gothique dans la soirée du 15 avril 2019.

Au cours des mois qui ont suivi le drame, ils avaient été provisoirement stockés sous des barnums installés sur le parvis, le temps de leur attribuer un espace de conservation adapté. *« Mais rapidement, il y a eu urgence à les déplacer dans un endroit plus protégé,* explique Stéphane Deschamps, conservateur régional de l'archéologie d'Île-de-France, chef du SRA (Service régional de l'archéologie) de la Direction régionale des affaires culturelles (Drac) Île-de-France et spécialiste des opérations archéologiques menées à Notre-Dame de Paris. *D'abord, parce que sous ces tentes, ils s'abîmaient vite, ensuite parce qu'ils posaient des problèmes de toxicité à cause de leur contamination au plomb.* » Environ 400 tonnes de plomb

présentes dans la toiture et la flèche ont en effet fondu, libérant un panache de fumée chargé de particules toxiques difficiles à éliminer. *« On a donc fini par rapatrier dans ce lieu ces vestiges à partir de mai 2020, et nous y voilà »*, poursuit l'expert en poussant la porte de l'immense entrepôt d'où la lumière du jour pénètre depuis de hautes fenêtres. Vêtus d'une combinaison de protection contre ces aérosols de plomb, nous nous enfonçons dans les allées. Les gargouilles, gueule béante et yeux exorbités, ont l'air hagard, comme perdues sans les toits de Paris sur lesquels elles avaient toujours régné. Les poutres calcinées de la charpente, encore impressionnantes malgré leur étrange robe noire, nous surplombent à la manière de ces matériaux bruts perchés à plusieurs mètres de hauteur dans les magasins de bricolage. Nous sommes bien sûr loin, très loin de produits qui sortent d'usine. De la statue en pied au petit morceau de ferraille, les vestiges qui s'alignent à perte de vue ont entre 150 et 900 ans. *« Nous parlons bien de vestiges et non de gravats à ce stade,* tient à préciser Stéphane Deschamps. *Même si, d'ici à quelques semaines, certains d'entre eux deviendront bel et bien des gravats à évacuer, car il est impossible de tout garder.* » Rien que dans la zone réservée aux restes de la charpente — la fameuse « forêt » bâtie entre le XII^e^ et le XIII^e^ siècle —, plus de 11 000 morceaux de bois ont été extirpés des monticules de matériaux effondrés. *« Nous avons fait le choix d'un prélèvement systématique de tout, absolument tout, ce qu'il y avait à terre, en sachant que viendrait plus tard le temps du tri. Cette phase a débuté au mois de mars de cette année »*, explique Stéphane Deschamps.

La plupart des vestiges iront dans les réserves de la Drac

Pour sélectionner ce qui doit être gardé ou jeté, lui et son équipe d'experts ont mis au point des critères de sélection. S'il va de soi que seront conservées les grandes sculptures encore en un seul morceau, dont certaines arborent désormais une coloration rouille due à l'intense chaleur générée par le brasier (*lire l'encadré ci-contre*), le sort d'autres vestiges est moins évident au premier coup d'œil. *« Nous avons établi un protocole de sélection qui, dans les grandes lignes, vise à conserver tout ce qui a le moindre intérêt historique »*, détaille Florence Mousset, ingénieure d'études à la Drac Île-de-France.

Ainsi, toute pierre qui porte des marques laissées par le geste de l'artisan qui l'a taillée, toute trace de décor sculpté, même partiel, ou encore de polychromie, sera conservée. *« D'ici à quelques semaines, nous aurons une idée précise de la quantité d'éléments qui aura vocation à être gardée,* affirme Stéphane Deschamps. *Il n'y a aucun objectif chiffré à remplir. Ce qui doit être préservé sera préservé, peu importe le nombre d'éléments que cela*

CONSERVATION

Des gargouilles d'origine remplacées par des copies

Parce qu'elles ont été exposées à des températures allant de 200 à 500 °C, suffisantes pour provoquer des altérations esthétiques (dans le cœur du brasier, la température a pu monter à plus de 1000 °C), des dizaines de statues ont dû être « déposées » de la cathédrale afin de garantir leur conservation.

STEPHANE DE SAKUTIN / AFP

Sculptures et gargouilles fragilisées resteront dans les réserves, consultables par les chercheurs.

« Certaines présentent des cloquages ou des fragilisations diverses dues aux flammes, qui leur ont parfois donné un aspect brun-rouge, a expliqué Jonathan Truillet, conservateur du patrimoine et adjoint de la directrice générale déléguée de l'établissement public Rebâtir Notre-Dame de Paris. *Aussi fallait-il absolument les retirer de la cathédrale pour les préserver.* » Les dommages causés par le feu ne sont d'ailleurs pas les seuls à avoir motivé une dépose. *« Certains éléments extérieurs trop abîmés par le temps ont aussi été démontés. C'était l'occasion.* » Parmi eux, des sculptures médiévales mais aussi des gargouilles, imaginées au XIX^e^ siècle par Eugène Viollet-le-Duc. Pas question néanmoins de laisser des trous béants à leurs emplacements respectifs : la plupart de ces éléments de statuaires ont été ou seront remplacés par des copies qui endureront sans mal les caprices de la météo, du moins pour les siècles à venir.

STEPHANE DE SAKUTIN / AFP

Les dizaines de milliers de « fragments » de Notre-Dame entreposés depuis mai 2020 ont entre 150 et 900 ans.

représente. D'ailleurs, cette consigne a perturbé les chercheurs au début, persuadés qu'ils auraient un quota à tenir. » La majeure partie de ces vestiges rejoindra les réserves de la Drac, dans un espace de conservation encore à aménager, et pourra être consultée sur demande par les chercheurs. Le reste devrait être dispatché dans les musées, notamment les plus belles pièces.

Mais alors, faut-il comprendre que ce qui ne sera pas sélectionné partira… à la poubelle ? *« Il est vrai que l'image est un peu rude mais il faut avoir conscience que ces pièces — qui seront tout de même nombreuses à être échantillonnées — n'ont plus aucun intérêt historique ou même esthétique,* explique Florence Mousset, en pointant ce qui ressemble à un caillou informe d'environ 15 centimètres de long. *Prenez ce morceau de pierre par exemple : il est impossible à distinguer d'un débris de chantier actuel. Nous ne pouvons plus rien en tirer et ça, on le voit tout de suite.* »

La vente au public est légalement impossible

La question nous brûle forcément les lèvres : ces petits bouts d'histoire ne pourraient-ils pas être vendus en guise de souvenir au public plutôt que de finir à la benne ? *« Impossible,* lance Stéphane Deschamps. *On ne peut pas vendre le patrimoine français, même en petits morceaux.* » Le code du patrimoine (articles L. 2112-1 et L. 3111-1) stipule en effet que tout élément d'un monument historique, propriété de l'État, est inaliénable et imprescriptible, même détaché ou effondré. *« Sans parler du fait qu'ils sont contaminés au plomb* », rappelle Florence Mousset, qui nous encourage fortement lors de la visite à ne pas se toucher le visage.

Même si Notre-Dame aura été amputée d'une partie de ses éléments d'origine, il faut tout de même garder à l'esprit que jamais aucun monument historique n'aura été étudié de façon aussi complète et minutieuse dans l'histoire du patrimoine. *« On l'a numérisé sous toutes ses coutures,* relativise Stéphane Deschamps. *Aujourd'hui, on réfléchit même à numériser les rejets, la difficulté étant de se projeter sur les travaux futurs sur les matériaux. Nous ne voulons avoir aucun regret.* » D'ici à un an, la Drac aimerait rendre la clé de l'entrepôt loué à une entreprise. Les vestiges choisis pour entrer dans les réserves de l'institution entameront alors pour de bon leur seconde vie, au service de la science. ■

Marine Benoit

DRAC ÎLE-DE-FRANCE / SOTHEAN NHIEIM

« Nous avons établi un protocole de sélection qui vise à conserver tout ce qui a le moindre intérêt historique »

Florence Mousset, ingénieure d'études à la Drac Île-de-France

HEIDI & HANS-JÜRGEN KOCH/NATUREPL./EBPHOTO

La société des gorilles de l'Ouest est moins machiste qu'il n'y paraît.

Le pouvoir insoupçonné des femelles gorilles

La primatologue Shelly Masi décrypte la vie dans les clans de gorilles de l'Ouest où les femelles jouent un rôle bien plus important qu'on ne le pense.

SEXISME Fascinée par les « dos argentés », ces puissants mâles dominants qui veillent chacun sur leur clan, la primatologue Shelly Masi, n'imaginait pas que les femelles gorilles de l'Ouest, deux fois plus petites et lui *« faisant penser à certaines reconstitutions peu avenantes d'australopithèques »* allaient devenir son plus beau sujet d'étude au long cours, entamée en 2000 en République centrafricaine. D'autant que nombre d'entre elles se montraient hostiles à la chercheuse et ses pisteurs bayaka et ruinaient bruyamment, agressivement leurs efforts pour habituer les clans à leur présence. Les gorilles ne sont pas les seuls colosses à charger dans les forêts de plaine dense où l'on entend mieux qu'on ne voit et où sont tapis d'irascibles éléphants. Chaque observation vaut son pesant de sueur, de peur, de silence, de patience et de prunelles écarquillées.

Mais le jeu caché des femelles en valait la chandelle. Caché, notamment par une grille de lecture sexiste qui attribuait au mâle tous les pouvoirs, dont celui de désigner celle qui partagerait sa couche. C'est l'inverse. Les femelles choisissent leur partenaire sexuel. Lui donnent volontiers leur petit à garder pour aller musarder. Le quittent s'il n'a pas su protéger le gorillon. Se montrent individualistes avec des personnalités aussi marquées que celles des mâles. Votent pour décider où mener le groupe et coordonner la marche. Peuvent se substituer au « dos argenté » pour former leur propre groupe. Bref, elles ont voix au chapitre dans la jungle et Shelli Masi nous la fait entendre dans un texte captivant. ■ **Rachel Fléaux**

Queen Kong. La loi de la jungle au féminin, Shelly Masi, Albin Michel, 270 p., 21,90 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 120
▶ C'est à voir p. 122
▶ Le ciel du mois p. 124
▶ Chroniques p. 126
▶ Questions de lecteurs p. 128
▶ Jeux p. 130

Démythifier l'IA

LIMITES Cocréateur de Siri et actuel directeur scientifique de Renault, Luc Julia a déjà consacré un livre démythifiant l'intelligence artificielle (IA). Il réitère ici l'exercice, ciblant les IA génératives. Mais il n'est pas question de les discréditer, plutôt de démonter les fausses croyances, voire les mensonges, sur les capacités d'outils qui restent époustouflants. La démonstration est argumentée, le raisonnement limpide, le ton jamais péremptoire. Car ce livre est mû par un enjeu : éviter qu'à force de promesses délirantes, l'IA ne déçoive et sombre dans un nouvel « hiver ». **A. D.**

IA génératives pas créatives, Luc Julia, Le Cherche Midi, 272 p., 19,80 €

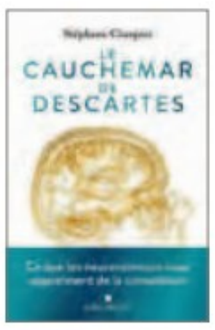
Passion océans

RÉCIT Sa vie entière est une aventure. Celle de la mer, reçue en héritage et cultivée sans relâche, qui a fini par se confondre avec celle d'une goélette pas comme les autres. Romain Troublé, directeur général de la fondation Tara Océan, raconte ici, avec la collaboration de notre consœur Sylvie Rouat, le parcours qui l'a mené d'une enfance rude à la montagne aux régates de haut niveau, de la quête de fossiles de mammouth en Sibérie jusqu'au cœur des expéditions scientifiques de Tara. Le récit croise souvenirs intimes, anecdotes palpitantes, et manifeste pour la protection des océans. **A. De. B.**

Aujourd'hui l'océan, Romain Troublé, Stock, 224 p., 19,90 €

Neurophilosophie de la conscience

VISION Et si nous n'étions que des pantins à la merci de notre activité neuronale ? Une trentaine d'années d'exploration des mécanismes cérébraux sous-jacents à la conscience a conduit Stéphane Charpier, directeur de recherche à l'Institut du cerveau, à Paris, à le penser. Assurément un cauchemar pour le *cogito, ergo sum* de Descartes, censé asseoir une conscience singulière et autonome. Le chercheur livre dans cet essai technique et enlevé une vision tout aussi vertigineuse de la conscience. **H. J.**



Le Cauchemar de Descartes, Stéphane Charpier, Albin Michel, 320 p., 22,90 €

L'histoire au microscope

CONTAGIONS L'histoire ne s'écrirait pas seulement au rythme des grandes batailles, mais aussi des micro-organismes. C'est la thèse défendue par le médecin et infectiologue Renaud Piarroux, qui retrace l'influence des épidémies sur le cours du monde. Sous sa plume, ce ne sont pas les colons européens, mais plutôt leur virus de la variole qui terrasse des milliers d'Aztèques. Le choléra, quant à lui, défait les troupes françaises, et les microbes deviennent des acteurs politiques à part entière. Pestes, tuberculose et variole, plus qu'une histoire médicale des épidémies, l'auteur en brosse une fresque sociale et montre qu'à chaque fois qu'un pathogène a réussi à infecter l'humain et à s'y adapter, *« la propagation des épidémies qui ont suivi a emprunté les voies commerciales et s'est insérée dans les flux de population »*. Entre croyances et biais cognitif, une leçon d'humilité toujours d'actualité face aux difficultés que nous avons à appréhender les maladies. ■ **Enola Tissandié**

Sapiens et les microbes. Les épidémies d'autrefois, Renaud Piarroux, CNRS Éditions, 398 p. 26 €

Scénarios catastrophes

EXTINCTION Que restera-t-il quand nous aurons disparu et que la surface de la Terre aura été stérilisée ou vitrifiée par un conflit nucléaire ? Des tunnels, des bunkers, des sites de stockage souterrains et, pendant quelques millions d'années, les satellites en orbite géostationnaire. Sans compter les artefacts déposés depuis Apollo 11 sur quelque corps du Système solaire ou envoyés vers les étoiles, avec des messages gravés à destination d'hypothétiques autres intelligences. Cette fin de la mémoire humaine n'est que l'un des scénarios catastrophes décrit par l'astrophysicien Alain Riazuelo. La première partie de cet ouvrage retrace l'histoire scientifique de la découverte que tout a un début : l'Univers, la Terre, la tectonique des plaques, la vie, etc. Mais aussi une fin. Pour preuve, ces grandes extinctions qui ont failli éradiquer la vie. Commence alors le récit fascinant et didactique de la disparition de la biosphère, de la Lune, de la Terre, du Soleil, de la galaxie, de l'Univers. ■ **Sylvie Rouat**

Dix scénarios pour la fin du monde, Alain Riazuelo, Tana éditions, 272 p, 18,90 €

Les grandes expéditions des astronomes

AVENTURIERS On les imagine dans le confort de leurs observatoires, les yeux rivés sur leurs télescopes ou tables de calcul. Mais pour compléter les cartes du ciel, étudier les astres et percer les secrets de l'Univers, les astronomes ont aussi beaucoup voyagé. Ils ont entrepris dès l'Antiquité une multitude d'expéditions aussi périlleuses qu'extraordinaires, des Indes orientales jusqu'aux abords du cercle arctique, que l'auteure — astrophysicienne et vulgarisatrice reconnue — raconte avec gourmandise et force détails dans ce livre. **F. D.**

Explorer le ciel, les planètes et la Terre, Yaël Nazé, Odile Jacob, 304 p., 24,90 €

EXPOSITIONS

Amboise (37)

S'inspirer du vivant, de Léonard de Vinci à nos jours
Les travaux de Léonard de Vinci dialoguent avec des recherches contemporaines par le prisme du biomimétisme. La nature inspirant l'innovation technique.
Château du Clos Lucé, 2, rue du Clos-Lucé, jusqu'au 10 septembre. Rens. : 02.47.57.00.73.

Bordeaux (33)

Les derniers remparts, Carcassonne 1304
Une immersion de 45 minutes dans la cité médiévale en pleine Inquisition. Le visiteur arpente les rues pavées et les remparts coiffé d'un casque de réalité virtuelle.
Lire notre reportage : sciav.fr/940carcassonne
Espace Eclipso, 19/21, rue Saint-Sernin. Rens. : 05.33.09.61.07.

Dijon (21)

Sols, la vie sous nos pieds
Une exploration d'un univers caché, la biodiversité des sols et leur rôle dans notre écosystème. Nous connaissons moins de 10 % des organismes qui y vivent.
Planétarium Hubert-Curien, 14, rue Jehan-de-Marville, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : 03.80.48.82.00.

Elbeuf (76)

Archéo, une expo à creuser !
Cette exposition est conçue comme un exercice pratique destiné à faire comprendre le métier d'archéologue. Comment fouille-t-on, avec quels outils ? Quels indices trouve-t-on ? Que fait-on des objets découverts ?
La Fabrique des savoirs, 7, cours Gambetta, du 5 juillet au 4 janvier 2026. Rens. : 02.32.96.30.40.

Lyon (69)

Trop forts !
Une mise en lumière des acclimations et des adaptations des animaux — dont l'humain — pour survivre en conditions extrêmes. .
Lire notre reportage : sciav.fr/939tropforts
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 31 décembre. Rens. : 04.28.38.12.12.

Monaco

Méditerranée 2050
La Méditerranée abrite près de 7 % des espèces marines de la planète. Les efforts pour sauvegarder ce patrimoine naturel sont détaillés sur plus de 500 mètres carrés.
Lire notre reportage : sciav.fr/941monaco
Musée océanographique de Monaco, avenue Saint-Martin. Rens. : (+377) 93.15.36.00.

Nîmes (30)

Gaulois, mais Romains !
L'histoire de la transformation de la société gauloise sous l'Empire romain, en plus de 200 objets et des reconstitutions numériques. On apprend comment s'est forgée l'identité gallo-romaine.
Musée de la Romanité, 16, boulevard des Arènes, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : museedelaromanite.fr

Paris (75)

Le monde selon l'IA
Dans ce parcours dense, la majorité des aspects de l'intelligence artificielle sont abordés, qu'ils soient techniques, physiques ou anthropologiques.
Les créations les plus anciennes ne remontent qu'à 2016.
Lire notre reportage : sciav.fr/940IA
Jeu de Paume, 1, place de la Concorde, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 01.47.03.12.50.

MUSÉE DES CONFLUENCES - BERTRAND STOFLETH

Les collections présentées sont animées par des vidéos filmées sur place avec les habitants des trois villages partenaires de l'exposition (ici les Mebêngôkre).

Lyon (69) / **Exposition**

Amazonies

En entrant, le visiteur dépose les images conventionnelles qu'il se fait de la forêt amazonienne brésilienne, dense et inhospitalière, pour y porter un nouveau regard. Car le parcours a été conçu en partenariat avec trois villages amérindiens : les Mebêngôkre (Kayapo), les Wayana et Apalaï, et les Asháninka. L'objectif est de raconter le quotidien, le savoir-faire et les traditions de ces villages, de leur point de vue. Les artefacts présentés et les voix de leurs résidents donnent vie à ces habitats. Le visiteur découvre également comment ces peuples utilisent les ressources de la forêt, certaines d'entre elles étant des marqueurs identitaires. C'est le cas de la peinture rouge orangée faite à partir du fruit du rocouyer, le rocou, et appliquée sur le corps et les objets. L'art de la plumasserie est, lui, essentiel chez les Mebêngôkre.
Le dernier espace de l'exposition traite de l'adaptation au contact de la ville et de la globalisation, preuve d'une identité en mouvement, hybride et résiliente.
Lire notre reportage : sciav.fr/941amazonies ■ **Nafi Terrasse**

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 8 février 2026. Rens.: 04.28.38.12.12.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Déserts
Un parcours sur les stratégies d'adaptation de la faune et de la flore dans les espaces arides, du Sahara à l'Antarctique.
Lire notre reportage : sciav.fr/941deserts
Muséum national d'histoire naturelle, Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 01.40.79.56.01.

Rennes (35)

Troisième nature
Le photographe Grégoire Eloy présente dix années d'exploration de paysages naturels, des glaciers pyrénéens aux côtes finistériennes. Un travail réalisé en collaboration avec des scientifiques.
Espace des sciences, 10, cours des Alliés, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 02.23.40.66.00.

Léonard de Vinci : à la croisée des arts et des sciences
Maquettes géantes, vidéos en 3D et reproductions de peintures et dessins font découvrir l'étendue des travaux de Léonard de Vinci. Lire notre reportage sur cette exposition à Villeneuve-d'Ascq : sciav.fr/922vinci
Espace des sciences, 10, cours des Alliés, jusqu'au 31 août. Rens. : 02.23.40.66.00.

Paris (75) / Exposition

Ce que l'horizon promet

AURÉLIEN MOLE, FONDATION GROUPE EDF 2025

◄ **« L'Explorateur »,** une sculpture de Philippe Ramette.

Plus de 69 000 dés à six faces agencés de manière à reproduire une vue satellite du cyclone Florence (août 2018) accueillent le visiteur. Les dés à jouer, comme symbole du hasard, et l'image satellite comme celui d'un désir d'anticiper. Œuvres et installations combinant art contemporain et sciences interrogent cette propension humaine à vouloir en savoir plus sur l'avenir, pour conjurer l'angoisse de l'incertitude. La science a beaucoup alimenté cette ambition. L'intelligence artificielle (IA), qui tient une bonne place dans l'exposition, la réactive, avec cette capacité à tirer des prédictions d'une quantité inimaginable de données. Mais dans un entretien vidéo, le mathématicien Cédric Villani rappelle que ces performances sont celles d'une technologie de l'expérimentation, sans théorie derrière. C'est l'inverse des principes de la science et le signe d'une difficulté à fonder un mécanisme de la prédiction. Lire notre reportage : sciav.fr/941horizon ■ **Arnaud Devillard**

Fondation EDF, 6, rue Récamier, jusqu'au 28 septembre. Entrée gratuite sur réservation. Rens. : 01.40.42.35.35.

Saint-Raphaël (83)

Parois vivantes, de la roche aux murs de la ville
Une mise en parallèle des peintures rupestres et de l'art graphique urbain contemporain.
Ou comment l'humain s'approprie les surfaces verticales pour créer et véhiculer des messages.
Musée Archéologique, place Louis-de-Fréjus, jusqu'au 25 septembre. Rens. : 04.94.19.25.75.

Toulouse (31)

Station spatiale Mir
La station russe fait l'objet d'une expérience de visite renouvelée, replacée dans le contexte des années 1990 et de la collaboration spatiale internationale.
Cité de l'espace, Avenue Jean-Gonord. Rens. : 05.67.22.23.24.

Vandoncourt (25)

Fourmis à la loupe
Apparues il y a 120 millions d'années, les fourmis sont présentes partout. La diversité des 12 000 espèces connues est détaillée ici.
La Damassine, 23, rue des Aiges, jusqu'au 23 décembre. Rens. : 03.81.37.78.30.

Paris (75) / Zoo

Intelligences animales

Connaissez-vous les IA ? Non pas les « intelligences artificielles » mais les intelligences animales. C'est le thème qu'a choisi le Parc zoologique de Paris pour sa saison 2025. *« Les visiteurs sont invités à dépasser leurs croyances autour du concept d'intelligence, trop souvent centré sur le seul être humain »*, précise Pierre-Yves Bureau, directeur du Parc. Le parcours met en évidence une vingtaine d'espèces. On retrouve ainsi le loup, qui excelle dans la coopération et la communication au sein de sa meute, ou encore le babouin, capable d'ajuster ses cris en fonction de la configuration environnementale, du statut social et du niveau d'attention de son interlocuteur. D'autres facultés sont moins connues, comme celles des corneilles qui savent résoudre des problèmes complexes et utiliser des outils. Lire notre reportage : sciav.fr/941zoo ■ **Lise Loumé**

MNHN - A. IATZOURA

◄ **L'exposition « Cerveauthèque »** présente des cerveaux d'animaux.

Parc zoologique de Paris, avenue Daumesnil, jusqu'au 2 novembre. Rens. : 08.11.22.41.22.

PARTENARIATS SCIENCES AVENIR

Marseille (13)

Lire le ciel. Sous les étoiles en Méditerranée
L'appréhension du ciel nocturne en Méditerranée, regardé depuis la Terre : elle est ici retracée avec près de 300 œuvres, des premiers relevés du ciel mésopotamien antique à l'actuelle astrologie, en passant par l'astronomie arabo-musulmane médiévale et la révolution galiléenne.
Mucem, esplanade du J4, du 9 juillet au 5 janvier 2026. Rens. : 04.84.35.13.13.

LE CIEL DE JUILLET

PAR JOHAN KIEKEN

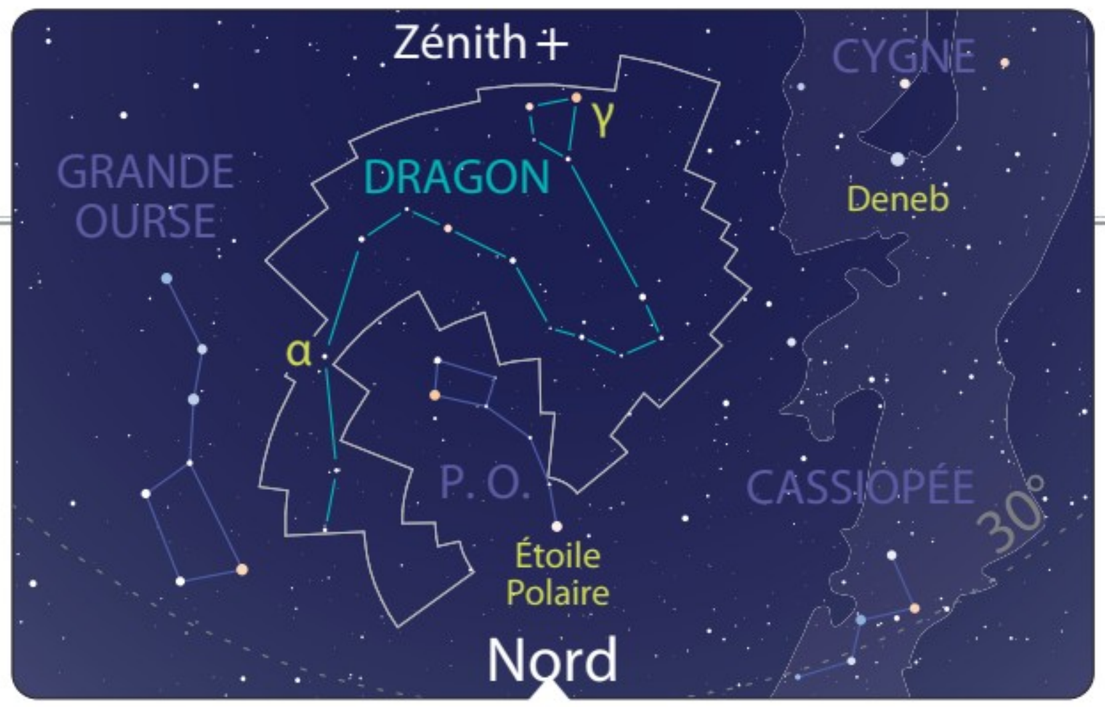
MERCURE La petite planète atteint sa plus grande distance angulaire (26°) à l'est du Soleil le 4. Malgré cette élongation favorable, elle n'est que marginalement observable en tout début de mois vers le couchant, avant d'être engloutie par les lumières du crépuscule.

VÉNUS L'étincelante étoile du Berger se lève 2 h 30 à 3 h avant le Soleil. Immanquable dans le ciel de fin de nuit et du matin, Vénus traverse ce mois toute la constellation du Taureau.

MARS La 4e planète n'est plus visible qu'en soirée, déjà assez basse vers l'ouest. D'un éclat désormais modeste, elle se couche de plus en plus tôt. Elle quitte la constellation du Lion pour celle de la Vierge le 28.

JUPITER Après son passage en conjonction avec le Soleil fin juin, la plus massive des planètes fait son retour dans le ciel du matin en seconde quinzaine. Très brillante, elle gagne de la hauteur au fil des jours.

SATURNE La planète aux anneaux est observable en seconde partie de nuit dans la constellation des Poissons. Bien que moyennement brillante, son repérage est facilité par l'absence d'étoile très lumineuse dans cette région du ciel.



Le Dragon est une grande constellation serpentiforme dont la tête se trouve près du zénith vers minuit. L'étoile orangée Eltanin (γ) est son hôte le plus lumineux. P. O. désigne la Petite Ourse.

La constellation du Dragon

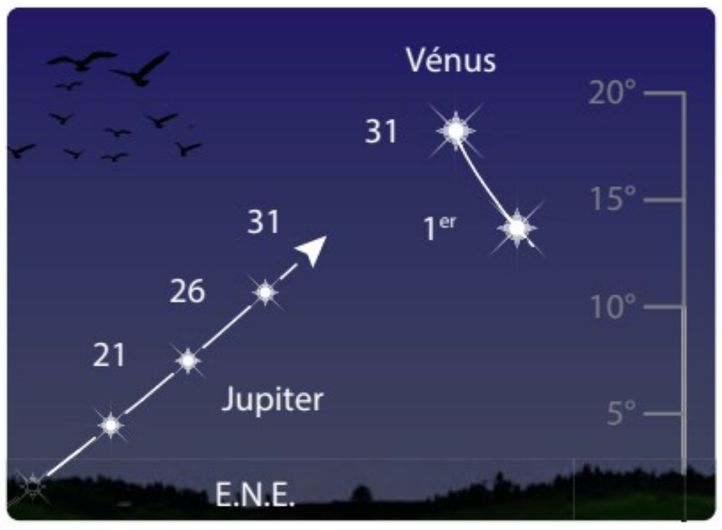
TOUT AU LONG DU MOIS DE JUILLET, la longue silhouette sinueuse du Dragon domine l'horizon nord. Cette constellation circumpolaire — elle ne se couche jamais — ondule entre la Petite et la Grande Ourse, semblant veiller sur l'étoile Polaire. Elle abrite Thuban (α) qui fut étoile polaire il y a près de 5000 ans.

Notre conseil La forme en losange de la tête du Dragon est un bon repère pour suivre la courbe de son corps, qui entoure la Petite Ourse. Peu lumineuse, la constellation se révèle mieux sous un ciel bien noir.

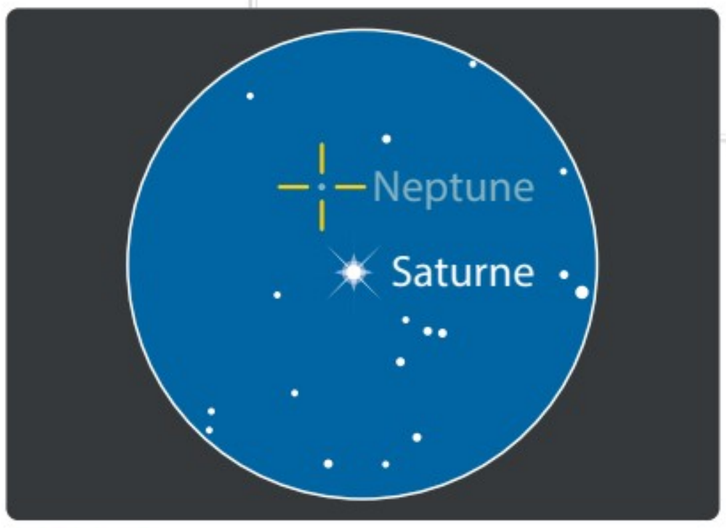
L'appli du mois

NIGHT SKY est une application gratuite pour iOS. Elle permet d'identifier étoiles, planètes et constellations en réalité augmentée, simplement en pointant son appareil vers le ciel. Elle propose aussi des alertes pour les événements astronomiques à venir. Une version payante donne accès à des fonctions avancées comme des visites guidées du ciel.

JEUDI 3, À 21 H 55 MIN PRÉCISÉMENT, la Terre passera à l'aphélie. La distance Terre-Soleil atteindra en cet instant son maximum pour 2025 et s'élèvera à 152 087 738 km.



EN JUILLET, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, Vénus brille intensément vers l'est-nord-est. Jupiter, qui fait sa réapparition dans le ciel matinal, va droit à sa rencontre.



CE MOIS, LA LOINTAINE NEPTUNE est à environ 1° de Saturne. Vous devriez pouvoir la repérer aux jumelles sous un ciel bien sombre, vers le sud-est, en fin de nuit.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juillet

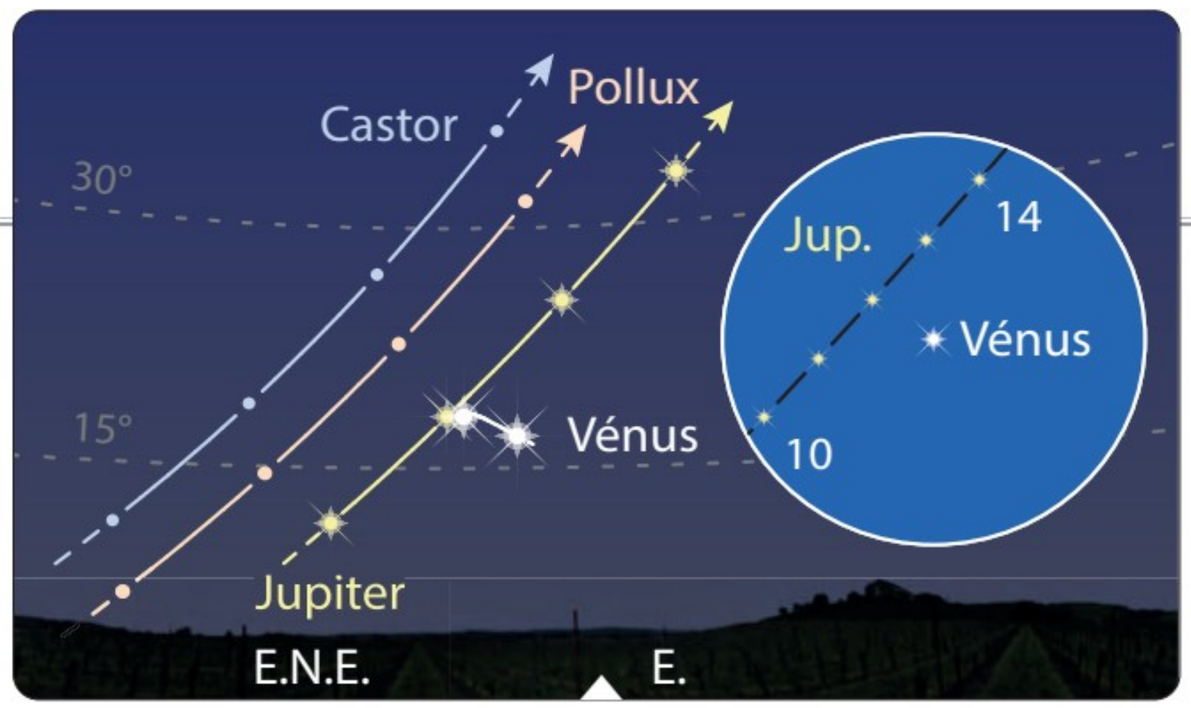
Où sont les planètes ?

MERCURE La planète de fer passe en conjonction inférieure le 1er et atteint sa plus grande distance angulaire (près de 19°) à l'ouest du Soleil le 19. Elle est bien visible pendant une dizaine de jours autour du 21, le matin vers le levant.

VÉNUS L'étoile du Berger domine toujours l'horizon est de son éclat remarquable en fin de nuit et au petit matin. Elle semble quasi stationnaire dans notre ciel ce mois.

MARS La planète Rouge devient difficilement visible en soirée, basse vers l'ouest. Elle disparaît en fin de mois, effacée par les lueurs du crépuscule. Nous ne la retrouverons qu'à la fin du printemps prochain, en fin de nuit.

JUPITER La planète géante s'extrait rapidement des lueurs de l'aube. Le 1er, elle se lève 2h20 avant le Soleil et 30 jours plus tard, elle le fera 4h30 avant lui. Jupiter sera la reine du ciel d'hiver. Mais d'ici là, ne manquez pas son rapprochement à Vénus en milieu de mois !

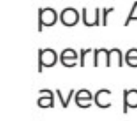


Il est 1 h avant le lever de l'astre du jour. Les positions de Jupiter et des étoiles Castor et Pollux sont données les 1er, 11, 21 et 31. La vue aux jumelles, sur la droite, est centrée sur Vénus. Elle couvre la période du 10 au 14.

Vénus et Jupiter : le grand rendez-vous

LE MATIN DU 12, Vénus et Jupiter sont séparées par moins de 1°. Bien que ces deux planètes semblent proches dans le ciel, elles se trouvent en réalité à des distances très différentes de nous : Jupiter est alors près de cinq fois plus éloignée que Vénus.

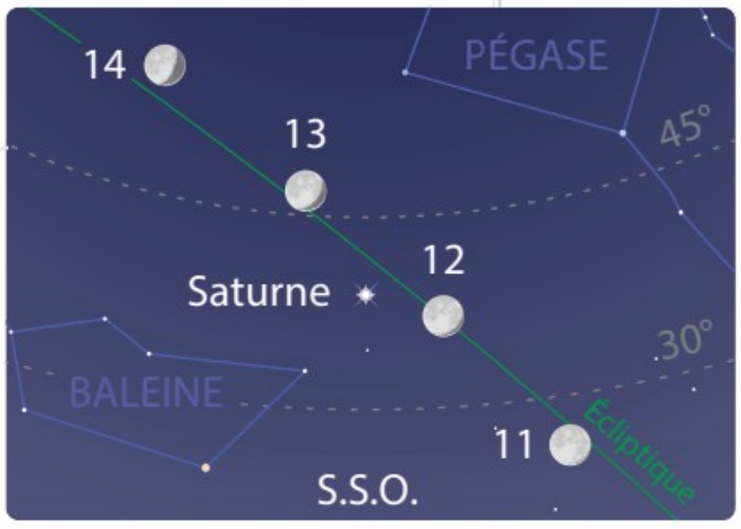
Notre conseil L'observation du phénomène est très facile… à condition de s'être levé tôt (repérez à l'avance l'heure du lever du Soleil dans votre ville) et de bénéficier d'un endroit bien dégagé, sans arbres ni immeubles devant vous. Et si vous avez des jumelles, n'hésitez pas à les sortir !



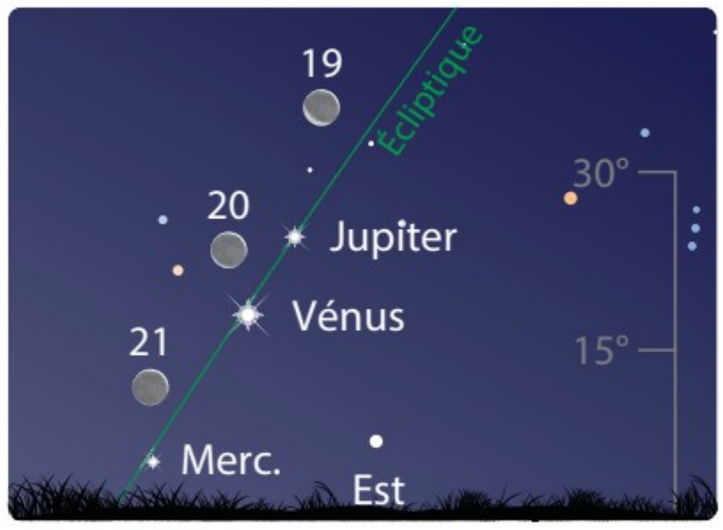
SATURNE À un mois de son passage à l'opposition, les conditions d'observation de la géante de gaz s'améliorent nettement. Elle se lève avant minuit et culmine avant l'aube à environ 40° de hauteur vers le sud.

L'appli du mois

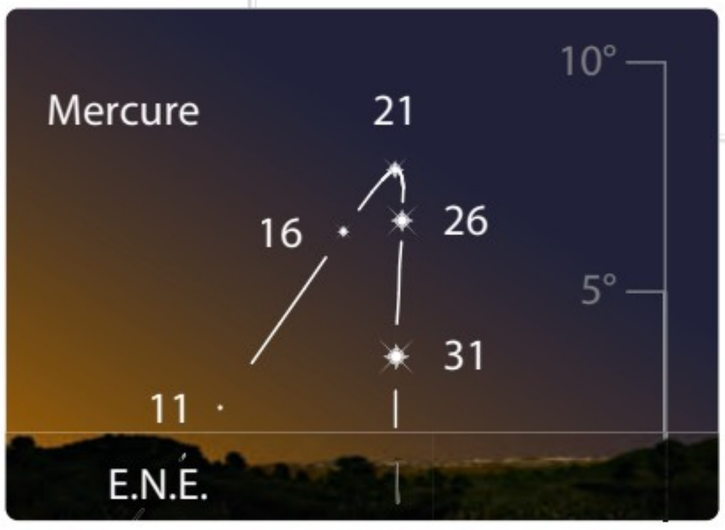
LEVER/ COUCHER DU SOLEIL est une application gratuite en français pour Android. Elle permet de connaître avec précision les heures de lever et de coucher du Soleil pour n'importe quel lieu sur Terre et à n'importe quelle date. L'interface est simple et efficace, avec la possibilité d'ajouter des alarmes et des notifications.



DU 11 AU 14, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, observez la Lune en phase gibbeuse décroissante s'approcher de la planète Saturne, la dépasser puis s'en éloigner.



DU 19 AU 21, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL de très jolis rapprochements et alignements sont à admirer, entre le fin croissant lunaire et Jupiter, Vénus et Mercure.



C'EST EN SECONDE MOITIÉ DE MOIS QUE LA PLANÈTE MERCURE se trouve dans les meilleures conditions d'observation. Nous sommes ici 45 minutes avant le lever du Soleil.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'août

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Nous n'avons pas d'autre choix que de rester déterminés

Pendant cinq ans, chaque mois, nous avons écrit cette chronique. Quel bilan ? Difficile de ne pas sombrer dans la morosité et l'inquiétude, emportés par un moment où l'autoritarisme s'installe, où le multilatéralisme s'effrite, où les fondamentaux de la vie démocratique ne sont plus questionnés mais bafoués, où l'intérêt général n'est plus la boussole mais devient source de division, clivages et invectives. Anesthésie d'un monde de solidarité, déliquescence d'une vision collective entretenue par de nouvelles formes de communication qui bousculent la place du réel, emportant les socles de la connaissance et du faire-science.

Côté climat et biodiversité, les mots de Franck Sherwood Rowland, prix Nobel de chimie en 1995 pour ses travaux sur la couche d'ozone, résument la situation : *« À quoi sert-il d'avoir réussi à développer une science suffisamment performante pour faire des prédictions si, au bout du compte, tout ce que nous sommes prêts à faire, c'est d'attendre qu'elles se réalisent ? »*

On ne peut nier certains progrès comme le développement des énergies renouvelables, l'intégration des analyses de risque des banques et acteurs économiques, l'émergence de nouveaux outils de monitoring comme les observations satellitaires sur la chasse aux fuites de méthane, etc. Mais nos actions sont loin d'être à la hauteur des enjeux ; elles condamnent l'habitabilité de demain.

Nous n'avons pas d'autre choix que de rester déterminés. Les risques environnementaux nous imposent lucidité, honnêteté, courage, équité et solidarité. Et pour les scientifiques qui documentent au quotidien la catastrophe ou qui évaluent des options d'actions pour l'éviter, l'engagement et la résistance à l'absurdité d'un monde « vivanticide » relèvent d'un devoir moral, éthique, humaniste. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Désillusion algorithmique

Dans les années 1990, j'ai assisté au rapide développement du World Wide Web. Soudain, il n'était plus nécessaire de passer par les télévisions, radios, journaux ou revues : chacun pouvait accéder directement à l'information, publier, chercher, partager. Un outil formidable de démocratie, court-circuitant les traditionnels points d'étranglement de l'information. Pour la première fois, les individus pouvaient espérer prendre le contrôle, s'informer au plus près des événements, sans intermédiaires. Se profilait un âge d'or pour la liberté d'expression. Las. 25 ans plus tard, l'outil merveilleux a été dévoyé. Nous voici submergés de contenus, de publicités, de photos de chats mignons, et surtout, d'une marée montante de désinformation, désormais automatisée et amplifiée par les intelligences artificielles génératives. Les bulles informationnelles rétrécissent notre monde, et l'ancienne dictature des médias a cédé la place à celle des plateformes, programmes et filtres invisibles qui choisissent pour nous ce que nous devons voir — ou ignorer. L'outil de libération est devenu un instrument de fragmentation, où chacun vit dans sa version de la réalité.

Scientifiques et journalistes partagent le même idéal, celui de chercher à approcher la vérité. Mais dans cette jungle numérique, comment discerner le vrai du faux, l'important de l'anecdotique ? Comment restaurer une culture du discernement dans un monde saturé d'infox ? C'est la question urgente de notre époque. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

« Double Je » ou double jeu au palais de la Découverte ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Du 11 juin au 5 octobre 2025 aurait dû se tenir au palais de la Découverte, enfin rouvert après cinq années de rénovation, l'exposition « IA Double Je » conçue par le Quai des savoirs et présentée à Toulouse en 2024 où elle a reçu un bel accueil. Cette exposition sur l'intelligence artificielle a été envisagée sous l'angle scientifique, afin d'en faire comprendre les principes et pas uniquement d'éblouir, comme il arrive trop souvent aujourd'hui. Quel lieu plus approprié que le palais de la Découverte pour l'accueillir, à l'occasion de sa réouverture ! Rappelons que, créé en 1937 pour l'exposition universelle, ce musée a été imaginé par Jean Perrin, prix Nobel de physique, et André Léveillé, artiste peintre, afin de montrer « la science en train de se faire » en la sortant des laboratoires pour stimuler l'intérêt de tous et susciter des vocations de chercheur. Suite au succès qu'il rencontra, le Front populaire décida de le pérenniser. Et, ce fut ensuite un modèle pour beaucoup d'autres musées des sciences, en particulier pour l'Exploratorium de San Francisco, créé en 1969 par le physicien Frank Oppenheimer.

À l'heure où certains discréditent la science auprès de l'opinion et, surtout, où il y a une désaffection des jeunes générations pour les études scientifiques, on ressent, plus encore qu'auparavant, la nécessité de tels lieux destinés à initier à l'enquête scientifique en mettant en scène des expériences et des manipulations de laboratoire. Soulignons qu'on ne se contente pas ici de piquer l'attention des citoyens et de les amuser en leur présentant des curiosités, comme le font trop d'autres musées aujourd'hui, mais qu'on aspire à les éveiller à la démarche scientifique. Au motif du retard des travaux, l'ouverture de l'exposition « L'IA Double Je » a été différée. Prions qu'il ne s'agisse pas ici d'un double jeu d'autorités qui, trop peu soucieuses de science, détourneraient le palais de la Découverte de sa vocation initiale et l'emploieraient à d'autres fins, ainsi que certains le craignent ! ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

Le ministre américain de la Santé Robert Kennedy Jr. a limogé les 17 experts d'un comité sur les vaccins, dénonçant leurs liens avec l'industrie pharmaceutique. Il promet un panel *« impartial »* pour restaurer la confiance du public. Une décision vivement critiquée par des scientifiques, qui y voient un pas de plus dans l'orientation vaccino-sceptique de l'administration Trump. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

ASTROPHYSIQUE

Que se passe-t-il si un trou noir s'approche d'un trou blanc ?

René T.

« A priori, *il ne se passe rien de spectaculaire car rien ne peut pénétrer dans un trou blanc, pas même un trou noir !* », répond l'astrophysicien Éric Gourgoulhon. Mais l'existence des trous blancs n'est pour l'instant qu'une hypothèse, aucun n'ayant encore été débusqué dans l'Univers. Proche parent du trou noir, il en est comme l'image dans un miroir… qui inverserait le cours du temps ! Contempler un trou blanc reviendrait à dérouler le film d'un trou noir à l'envers. Il ne fait ainsi que recracher de la matière et de l'énergie, tandis que le trou noir les avale. S'il est impossible de s'échapper d'un trou noir, il l'est tout autant de pénétrer dans un trou blanc. ■ **Fabrice Nicot**

EMBRYOLOGIE

À combien de semaines de grossesse le cœur de l'embryon bat-il ?

Bernadette T.

Le cœur est le tout premier organe fonctionnel de l'embryon. Sa formation commence dès la 3e semaine après la fécondation et son architecture définitive est établie à la 7e semaine. À ce stade, il bat déjà. « *Mais ce n'est qu'entre la 9e et la 10e semaine de grossesse qu'une échographie est généralement proposée pour faire entendre ses battements* », précise Damien Bonnet, de l'hôpital Necker-Enfants malades, à Paris. Les pulsations cardiaques, comprises entre 150 et 180 battements par minute en moyenne, sont deux fois plus rapides que celles d'un adulte. Ce rythme soutenu est un signe essentiel de la vitalité de l'embryon. ■ **Coralie Lemke**

JEAN-PIERRE LESCOURRET/HEMIS.FR

Les ouvrages modernes (ici, le viaduc de Millau) ont une durée de vie limitée.

MATÉRIAUX

Combien de temps faudrait-il à la nature pour effacer les traces de notre civilisation ?

Sébastien L.

Si l'humanité venait à disparaître brutalement, la nature aurait étonnamment peu de travail à fournir pour faire disparaître les traces de notre civilisation. « *Les archéologues du futur, dans 2000 ans, ne retrouveraient rien de nos édifices, parce que nous les construisons avec une date de péremption* », affirme Valérie L'Hostis, ingénieure au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et experte dans le vieillissement des matériaux.

Là où les Égyptiens et les Romains misaient sur la masse et la durée (pyramides colossales, bétons très résistants), les ouvrages modernes sont calibrés pour une certaine durée de vie fonctionnelle. Prenons un symbole d'ingénierie française : le viaduc de Millau. « *Il est construit pour 120 ans* », rappelle l'ingénieure. Passé ce cap, il devra être remplacé. « *Tous les immeubles d'habitation construits il y a 50 ans étaient conçus pour 50 ans* », ajoute-t-elle. Cette logique découle de normes strictes, et surtout de la spécialisation des fonctions des ouvrages : ils peuvent remplir un rôle mécanique (le port de charges des ponts), de confinement (les silos à grain) ou encore esthétique (lieux de culte modernes). Une fissure, une corrosion, un changement de normes, et le bâtiment est bon pour la déconstruction. La nature, elle, n'a plus qu'à accélérer la ruine planifiée par les humains. La seule exception à ce tableau pourrait venir de nos déchets nucléaires. « *Les dispositifs pour les stocker doivent être pensés pour durer des millions d'années* », rappelle Valérie L'Hostis. ■ **Hervé Ratel**

SCIENCES ET AVENIR & La Recherche

présentent

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

4ème ÉDITION

72H POUR DÉCOUVRIR L'EXTRAORDINAIRE RICHESSE DES ABYSSES.

26 - 27 SEPT. 2025
LA CITÉ DE LA MER
CHERBOURG-EN-COTENTIN

24 - 27 SEPT. 2025
EN PLEIN AIR
SAINT-VAAST-LA-HOUGUE

- ET EN DIGITAL -

Conférences et débats portés par les plus grands spécialistes, animations...
Nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Grand Océan s'inscrit dans le cadre de la Conférence Océan des Nations-Unies (Nice 2025).

Photo : © P.G - stock.adobe.com - Conception : **MEDIAOBS** LE STUDIO

Partenaires officiels

Partenaires Associés

Partenaires

Partenaires médias

Organisé par

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Voici quelques problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité.

▸ Carré de carrés

Complétez en entiers pour que dans chacun des 16 sous-carrés de 2 x 2 la somme soit identique.

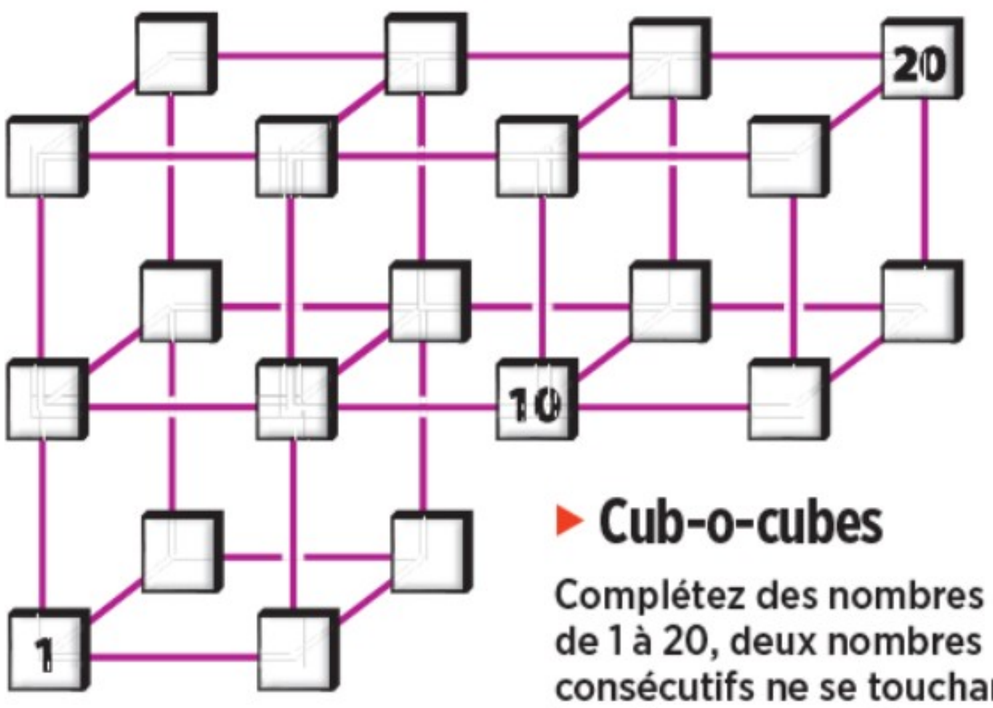
	7			
8		9	2	
	4		4	
	4	7		6
5			3	

▸ Henri et Lolita

Quels chiffres peuvent remplacer les lettres pour valider l'opération ?

```
  HENRI
×    II
-------
LOLITA
```

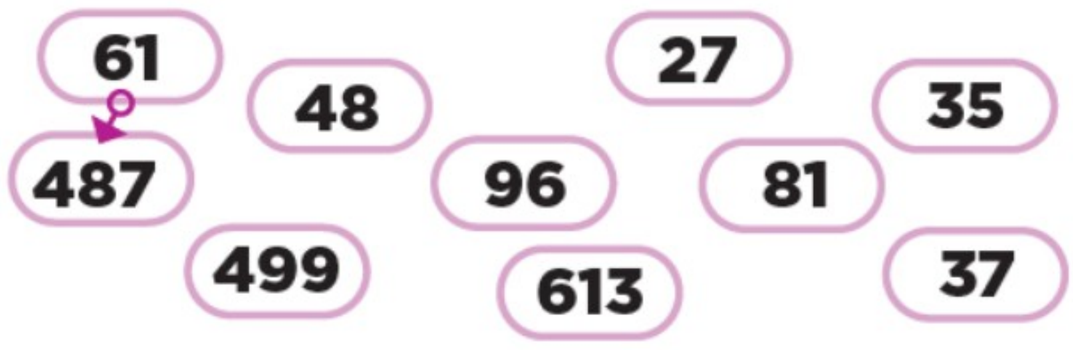
▸ Cub-o-cubes



Complétez des nombres de 1 à 20, deux nombres consécutifs ne se touchant jamais par une arête.

▸ Trajet numérique

Joignez ces dix nombres en partant de 61, sans passer deux fois par le même et sans qu'aucun n'ait de diviseur commun avec le suivant



Solutions des jeux

N° 940, juin 2025

▸ Chasse aux signes
1 + (2 x 3 x 4 x 5) - 6 + (7 x 8) - 9 = 162

▸ Logique baroque
La, Ré et Mi dans le compartiment 101, Do, Fa et Sol dans le 102.

▸ Logique à la carte
Saumon = 18 (nombre de voyelles x 6)

▸ Phrase bouleversée
On peut voir celui qui regarde mais on ne peut pas entendre celui qui écoute.

Le premier groupe de trois mots est inversé : 1-2-3 devient 3-2-1, le groupe suivant est dans le bon ordre et ainsi de suite.

▸ Intrus logiques
256 : le seul nombre pair
256 : le seul carré parfait
231 : le seul multiple de 3
231 : le seul multiple de 7
85 : le seul multiple de 5
85 : le seul multiple de 17
677 : le seul comprenant 2 chiffres égaux

N° 941/942, juillet/août 2025

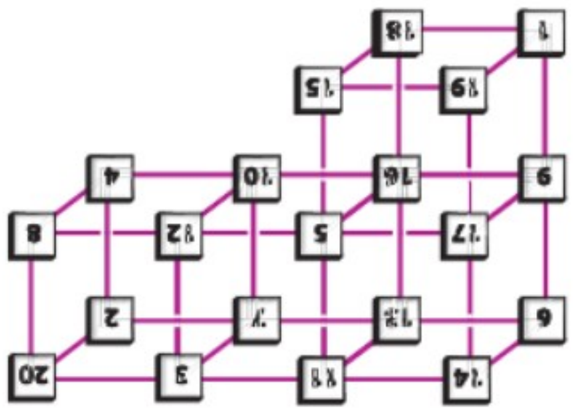
▸ Carré de carrés

5	3	4	3	5
6	4	7	4	6
4	4	3	4	4
8	2	9	2	8
1	7	0	7	1

▸ Trajet numérique
61, 487, 499, 48, 613, 96, 35, 81, 37, 27

▸ Henri et Lolita
39 012 x 22 = 858 264

▸ Cub-o-cubes : une solution



LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

Depuis 1992, notre **entreprise familiale** sélectionne pour vous **les meilleures plantes** pour une **santé renforcée** au **quotidien**.

"Les produits des Laboratoires ILAPHARM me conviennent tout à fait, ils sont efficaces."

Avis vérifiés Juin 2025 - Rita M. ★★★★★

OFFRE DÉCOUVERTE
TOUT À **7€***

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

JAMBES LOURDES
- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules **(15 jours)**

ARTICULATIONS
- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum *(1)*

45 gélules **(15 jours)**

MINCEUR
- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal !

(1), (2), (7), (16)

45 gélules **(15 jours)**

LIBIDO
- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran !

45 comprimés **(20 jours)**

OS & ARTICULATIONS
- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

45 gélules **(15 jours)**

DIGESTION
- Ballonnement et flatulences
- Soulagement rapide

(6), (15)

45 gélules **(11 jours)**

PROSTATE
- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules **(22 jours)**

STRESS
- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

*Allergène : **poisson**. (4)*

45 gélules **(20 jours)**

CHOLESTÉROL
- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire

(10), (12)

30 gélules **(8 jours)**

SEXUALITÉ
- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca !

(3)

20 gélules **(10 jours)**

MÉMOIRE
- Favorise la circulation cérébrale
- Concentration
- Esprit vif et alerte

(2), (5), (12), (13)

45 gélules **(15 jours)**

FOIE - DRAINEUR
- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie

(7), (8), (9)

10 ampoules **(5 jours)**
~~15,60€~~

IMMUNITÉ
- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année !

(8), (14)

45 gélules **(15 jours)**

SOMMEIL
- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules **(22 jours)**

POUR LA GORGE
- Douceur du miel pour la gorge
- Aromatisés à l'Eucalyptus

50 g
~~9,70€~~

CAPITAL-VISION
- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle

(11)

10 ampoules **(10 jours)**
~~18,40€~~

VOS CADEAUX

OFFERT dès 20€ d'achat

Le Ventilateur
Dim. : 13,8 x 9,8 x 12,2 cm. Plastique noir.
Câble USB fourni.

La Livraison Dès 25€ d'achat
Au lieu de ~~6,50€~~ **0€**

Pour toute commande sur : **www.ilapharm.com** recevez un **2ème CADEAU**

OFFERT dès 30€ d'achat

Pour plus de promotions et commander :
www.ilapharm.com
ou avec **votre smartphone**

VOTRE CODE PRIVILÈGE : CS458

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Déconseillé en cas d'insuffisance cardiaque ou rénale œdémateuses. (3) Déconseillé en cas de prise simultanée d'antidépresseurs. (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Déconseillé aux personnes épileptiques. (6) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (7) Déconseillé en cas de problème de thyroïde. (8) Ne pas consommer en cas d'allergie aux plantes de la famille des Asteraceae. (9) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (10) Ne pas associer avec des anticoagulants. (11) En cas de troubles digestifs, consultez votre médecin avant consommation. (12) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (13) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur. (14) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. (15) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (16) Contient de la caféine (50 mg max par jour). Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

POUR COMMANDER

@ Sur notre site internet :
www.ilapharm.com
Possibilité de régler par chèque

ILAPHARM chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard
35230 NOYAL - CHÂTILLON-SUR-SEICHE

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS
*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

OFFRE DÉCOUVERTE - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ M^me ☐ M^r

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Réglement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

EFFICACITÉ PROUVÉE DÈS 2 MOIS DE CURE

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX	TOTAL
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45		7€	
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45		7€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
DIGESTION - Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45		7€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20		7€	
MÉMOIRE - Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		7€	
FOIE-DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		7€	
IMMUNITÉ - Echinacéa BIO	PECB45		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45		7€	
GORGE - Bonbons à la propolis	EVAB		7€	
CAPITAL-VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB		7€	
☐ Ma commande **atteint 20€**, je reçois mon **VENTILATEUR**				**OFFERT**
☐ Ma commande atteint 25€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**				**OFFERTE**
☐ Ma commande est inférieure à 25€, **je rajoute 6,50€ de livraison**				
Code Privilège : **CS458**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

ŠKODA

Conçues pour tout.
Même conduire.

A 0 g CO_2/km
B
C
D
E
F
G

www.skoda.fr

Volkswagen Group France – SAS - Capital : 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne – 02600 Villers-Cotterêts – RCS Soissons 832 277 370.

Pensez à covoiturer **#SeDéplacerMoinsPolluer**